



**TÉCNICO**  
LISBOA

# **Deposição e Erosão de Sedimentos Finos**

Estudo em Canal Anular

**Ana Luísa Guerreiro Custódio**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

Orientador: Prof. Doutor António Alexandre Trigo Teixeira

Orientador: Doutor Luís Ivens Ferraz Saavedra Portela

**Júri**

Presidente: Prof. Jorge Miguel Silveira Filipe Mascarenhas Proença

Orientador: Doutor Luís Ivens Ferraz Saavedra Portela

Vogal: Prof. Carlos Daniel Borges Coelho

Vogal: Prof. António Alberto Pires Silva

**Abril 2016**



## Resumo

Situado no estuário do Tejo, o Porto de Lisboa é um dos principais portos nacionais dispendo de excelentes condições de acesso e abrigo. Devido à grande afluência de todo o tipo de embarcações, é necessário que os canais, bacias de manobra e estacionamento e as docas situadas na zona interior do estuário se encontrem continuamente com bons níveis de operacionalidade. Porém, o fundo do estuário do rio Tejo é predominantemente composto por sedimentos finos do tipo coesivo que, devido à ação das correntes de maré e das ondas, encontram-se também em suspensão, sofrendo constante transporte e deposição ao longo dos canais. A deposição destes sedimentos nos canais condiciona a navegabilidade dos mesmos sendo necessário proceder a dragagens frequentes, cujos custos são elevados. Assim, a capacidade de prever o transporte de sedimentos finos tem uma importância económica e ambiental significativa na manutenção das instalações portuárias existentes e no desenvolvimento de novos projetos e obras. No entanto, devido à combinação complexa de processos (e.g. floculação, consolidação), esta capacidade de previsão é ainda limitada.

Neste trabalho pretende-se estudar o efeito da velocidade de escoamento nos processos de erosão e deposição dos sedimentos finos, para diferentes valores de salinidade da suspensão. O estudo foi realizado em canal anular no laboratório de sedimentos coesivos do LNEC. Os canais anulares são especialmente adequados para o estudo dos processos de transporte de sedimentos finos uma vez que evitam as singularidades de entrada e de saída dos canais retangulares. Os resultados obtidos são comparados com outros estudos anteriormente realizados, com objetivos e condições de ensaio semelhantes. Verifica-se que ocorre maior deposição de sedimentos finos para velocidades de escoamento mais baixas. Seria também expectável que a deposição ocorresse mais rapidamente para valores de salinidade mais elevados, uma vez que esta contribui para a agregação de partículas e consequente deposição. Porém, o efeito da salinidade na deposição não foi significativo, o que poderá em parte ser explicado pela importância das tensões turbulentas que provocam desagregação das partículas.

**Palavras-chave:** sedimentos coesivos, salinidade, granulometria, estuário do Tejo, correntes de maré.



## **Abstract**

Located in the Tagus estuary, the Port of Lisbon is one of the major national ports providing excellent access and shelter conditions. Due to the great inflow of a large range of vessels, it is important for the navigation channels, berths and docks located in the inner part of the estuary to have constant levels of operability. Nevertheless, the bottom of the river Tagus is predominantly composed of fine-grained cohesive sediments, which due to the action of the tidal currents and waves are found suspended and undergo constant transport and deposition along the navigation channels. The settling of this type of sediments in the channels impedes navigability, which leads to the necessity of frequent dredging, a typically expensive operation. Thus, the ability to foresee fine-grained sediment transport has a major economic and environmental importance on the maintenance of the existing port facilities, as well as on the development of new projects. However, due to a complex combination of processes (e.g. flocculation consolidation), this ability is still limited.

The main purpose of this work is to study the effect of flow velocity on the erosion and deposition processes of fine-grained sediments, in suspensions with different values of salinity. The study was performed in an annular flume in the LNEC laboratory. This type of flumes is well suited to the study of the processes of fine-grained sediments transport, since they prevent the entry and exit features of the straight, rectangular flumes. The obtained results are compared with the results of other studies that were accomplished in the past, in which, the objective and experiment conditions were similar. The results show that there is greater deposition of fine sediments for lower flow velocities. It would also be expected that deposition occurred more rapidly for higher salinity values, since this contributes to particle aggregation and subsequent deposition. However, the effect of salinity on deposition was not significant, which may in part be explained by the importance of the turbulent stresses which cause disaggregation of the particles.

**Keywords:** Cohesive sediment, salinity, grain size, Tagus estuary, tidal currents.



## **Agradecimentos**

Ao meu pai que me possibilitou toda a minha formação académica, transmitindo sempre a maior confiança, compreensão e apoio nas minhas decisões.

Ao Professor Trigo Teixeira pela oportunidade de realizar este trabalho e incentivo nos momentos de dúvida e insegurança.

Ao Doutor Luís Portela, pela sua grande ajuda e disponibilidade ao longo de todo o tempo do trabalho.

Ao Senhor Fernando Brito, pela ajuda durante os ensaios laboratoriais e ajuda preciosa na reta final.

Ao Diogo, um agradecimento especial por todo o apoio incondicional, motivação e grande ajuda.

A todas as pessoas que me são queridas e que de uma forma, direta ou indireta me acompanharam neste percurso.





# Índice

Resumo .....	I
Abstract .....	III
Agradecimentos.....	V
Índice de figuras .....	<a href="#">IXVIII</a>
Simbologia .....	XI
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objetivo da dissertação.....	1
1.3. Organização da dissertação .....	2
2. Revisão bibliográfica .....	3
2.1. Propriedades dos sedimentos coesivos.....	3
2.1.1. Constituição e propriedades gerais .....	3
2.1.2. Flocculação.....	4
2.2. Deposição .....	5
2.3. Erosão .....	7
2.4. Estudos em canal anular .....	9
2.5. Ciclo de marés .....	12
3. Caso de estudo: Porto de Lisboa.....	15
3.1. Localização e caracterização .....	15
3.2. Dragagens no estuário do Tejo.....	16
3.3. Velocidades de escoamento e salinidade .....	17
3.4. Marina do Parque das Nações.....	18
4. Metodologia.....	19
4.1. Colheita do sedimento.....	19
4.2. Preparação da suspensão .....	19
4.3. Análise granulométrica.....	20
4.3.1. Método de difração laser .....	20
4.3.2. Difratómetro laser.....	21
4.4. Descrição do canal.....	21
4.5. Procedimentos experimentais .....	23
4.5.1. Preparação dos ensaios.....	23
4.5.2. Variação de salinidade.....	24
4.5.3. Descrição dos ensaios.....	24

5. Apresentação e discussão de resultados .....	27
5.1. Concentração e velocidade em função do tempo .....	27
5.1.1. Ensaio de maré .....	27
5.1.2. Ensaio de deposição .....	31
5.2. Granulometria e velocidade em função do tempo .....	34
5.2.1. Ensaio de maré .....	35
5.2.2. Ensaio de deposição .....	37
6. Conclusões.....	39
7. Referências Bibliográficas .....	41
ANEXOS .....	43

## Índice de figuras

Figura 1 – Efeito da salinidade no estudo de Delo (1988): tensão de corte no fundo = 0,36 N/m <sup>2</sup> , C <sub>0</sub> ≈ 1,0 kg/m <sup>3</sup> (adapt. de Delo (1988)).	9
Figura 2 - Efeito da salinidade no estudo de Delo (1988): tensão de corte no fundo = 0,07 N/m <sup>2</sup> , C <sub>0</sub> ≈ 1,0 kg/m <sup>3</sup> (adapt. de Delo (1988)).	10
Figura 3 - Efeito da salinidade no estudo de Delo(1988): tensão de corte no fundo = 0,00 N/m <sup>2</sup> , C <sub>0</sub> ≈ 1,0 kg/m <sup>3</sup> (adapt. de Delo (1988)).	10
Figura 4 – Condições de ensaio do estudo da Ria de Aveiro (adapt. de Portela e Brito (2010)).	11
Figura 5 – Evolução da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de curta duração. Ensaio 1: velocidade 0,65 m/s (adapt. de Portela e Brito (2010)).	12
Figura 6 – Estuário do Tejo	15
Figura 7 - Locais de dragagem e de imersão de sedimentos no estuário do Tejo (adapt. de Cabral (2010)).	17
Figura 8 – Marina do Parque das Nações.	19
Figura 9 - Difratómetro Malvern Mastersizer Micro	20
Figura 10 – Esquema da unidade e amostragem do difratómetro Malvern Mastersizer Micro: (1) braço de bombagem; (2) bomba; (3) tubos de circulação; (4) misturador; (5) sonda ultras-sons; (adapt. Freire, 2003).	21
Figura 11 – Canal anular do LNEC	22
Figura 12 – Amostra concentrada do sedimento	23
Figura 13 – Canal anular com suspensão do sedimento	23
Figura 14 – Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré 1	27
Figura 15 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré 2	28
Figura 16 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré 3	28
Figura 17 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré 4	29
Figura 18 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré 5	29
Figura 19 – Concentração em função do tempo para os ensaios de maré 1, 2, 3, 4 e 5	30
Figura 20 – Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de deposição 1	31
Figura 21 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de deposição 2	31
Figura 22 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de deposição 3	32
Figura 23 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de deposição 4	32
Figura 24 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de deposição 5	33
Figura 25 - Concentração e velocidade em função do tempo para os ensaios de deposição 1, 2, 3, 4 e 5	34
Figura 26 – Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaios de maré.	35
Figura 27 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaios de maré.	35
Figura 28 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaios de maré.	36
Figura 29 – Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaios de deposição	37
Figura 30 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaios de deposição	37
Figura 31 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaios de deposição	38



## Simbologia

$b$	Largura da secção	$L$
$c$	Concentração de sedimentos em suspensão	$ML^{-3}$
$c_i$	Concentração de sedimentos em suspensão da classe $i$	$ML^{-3}$
$C_0$	Concentração inicial	$ML^{-3}$
$C_f$	Concentração residual	$ML^{-3}$
$d_i$	Diâmetro da partícula $i$	$L$
$D$	Taxa de deposição	$ML^{-2}T^{-1}$
$E$	Taxa de erosão	$ML^{-2}T^{-1}$
$E_0$	Taxa de erosão da partícula	$ML^{-2}T^{-1}$
$g$	Aceleração gravítica	$LT^{-2}$
$h$	Altura de escoamento	$L$
$K(d_i, d_j)$	Frequência de colisão entre duas partículas $i$ e $j$	-
$M$	Coeficiente de erosão	$ML^{-2}T^{-1}$
$n$	Coeficiente de Manning	$TL^{-1/3}$
$n_i$	Concentração da partícula $i$	$ML^{-3}$
$N_{ij}$	Número de colisões ocorridas por unidade de tempo e de volume entre duas classes de partículas $i$ e $j$	-
$p$	Probabilidade de deposição	-
$p_i$	Probabilidade de deposição da classe $i$	-
$r$	Raio médio do canal	$L$
$u_{av,b}$	Velocidade média do escoamento referida à base do canal	$LT^{-1}$
$u_*$	Velocidade de atrito	$LT^{-1}$
$w_s$	Velocidade de sedimentação	$LT^{-1}$
$w_{s_i}$	Velocidade de sedimentação da classe $i$	$LT^{-1}$
$w_t$	Velocidade angular do anel	$LT^{-1}$
$w_b$	Velocidade angular da base	$LT^{-1}$
$z$	Coordenada vertical	$L$
$\alpha$	Percentagem de colisões eficazes	-
$\rho$	Massa volúmica da água	$ML^{-3}$
$\tau$	Tensão de corte no fundo	$ML^{-1}T^{-2}$
$\tau_{d,total}$	Tensão de corte crítica de deposição total	$ML^{-1}T^{-2}$
$\tau_{d,parcial}$	Tensão de corte crítica para a deposição parcial	$ML^{-1}T^{-2}$

$\tau_e$	Tensão de erosão	$ML^{-1}T^{-2}$
$\tau_{ce}$	Tensão crítica para a erosão	$ML^{-1}T^{-2}$
$t$	Tempo	$T$

# **1. Introdução**

## **1.1. Considerações gerais**

O estudo da erosão e deposição de sedimentos finos em estuários é essencial para um melhor conhecimento e previsão do comportamento dos fundos, tornando-se ainda mais importante no caso em que os estuários são navegáveis como o estuário do Tejo.

Os sedimentos existentes em estuários são predominantemente de origem silto-argilosa e podem constituir problemas muito relevantes, em termos ambientais e económicos devido à sua capacidade de transporte e deposição junto às bacias portuárias.

O Porto de Lisboa é um dos principais portos nacionais e europeus, tendo excelentes condições geográficas e morfológicas que o tornam um ponto de passagem do comércio mundial. Porém, devido ao transporte de sedimentos finos é necessário grande investimento anual em dragagens de modo a garantir bons níveis de operacionalidade.

## **1.2. Objetivo da dissertação**

O objetivo do trabalho proposto é analisar experimentalmente, em canal anular, o efeito da velocidade do escoamento e da salinidade sobre os processos de erosão, transporte e deposição de uma amostra de sedimento proveniente do Porto de Lisboa. Em particular, pretende-se analisar o efeito da salinidade sobre o processo de deposição do sedimento em situação de velocidade não nula.

Para atingir estes objetivos, realizam-se ensaios de maré e de deposição. Concretamente, realizam-se 5 ensaios de cada tipo, cada um com diferentes valores de salinidade de modo a analisar a influência desta nos processos em estudo. Para esse efeito, monitorizam-se continuamente a concentração e a granulometria dos sedimentos em suspensão em cada um dos ensaios realizados.

Os ensaios de maré destinam-se à análise dos processos de erosão, transporte e deposição. Nestes ensaios a velocidade do escoamento é variável e pretende representar parte do ciclo de maré, constituído por velocidades máximas no início (a meia enchente ou a meia vazante), velocidades decrescentes até atingir velocidade nula a meio (maré cheia ou maré vazia) e velocidades crescentes até uma nova velocidade máxima no fim (a meia vazante ou a meia enchente). A duração destes ensaios é de 6 horas e 30 minutos, metade de um ciclo de maré normal.

Os ensaios de deposição visam especificamente o estudo do processo de deposição. Estes ensaios são realizados com uma redução súbita da velocidade inicial, a que se segue um período de 8 horas de velocidade baixa e constante do escoamento de modo a favorecer a deposição do sedimento.

O objetivo dos ensaios é analisar a evolução da concentração e granulometria dos sedimentos em suspensão ao longo do tempo.

### **1.3. Organização da dissertação**

A dissertação encontra-se organizada em duas partes, a primeira constituindo a componente conceptual da dissertação e a segunda a sua componente experimental, apresentadas em 6 capítulos.

O presente capítulo, Introdução, apresenta as primeiras considerações sobre o tema de estudo e o objetivo do mesmo.

O segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, expõe os conceitos teóricos referentes à erosão e deposição de sedimentos finos a partir de uma revisão da literatura existente sobre estes assuntos. Neste capítulo é ainda abordada a maré, tema fundamental para a compreensão do trabalho experimental.

O terceiro capítulo, Caso de estudo, relata parte da dinâmica do Porto de Lisboa relacionada com os problemas que os sedimentos finos provocam na sua navegabilidade.

O quarto capítulo, Metodologia, descreve os procedimentos preparatórios do trabalho experimental, métodos utilizados e a explicação da experiência realizada.

No quinto capítulo, Análise e discussão de resultados, são apresentados os resultados obtidos no trabalho experimental, e analisados e comparados com resultados de experiências anteriormente realizadas.

O sexto e último capítulo, Conclusões, conclui a discussão dos temas em estudo e a sua contraprova no trabalho experimental, objetivo central desta dissertação.



## **2. Revisão bibliográfica**

### **2.1. Propriedades dos sedimentos coesivos**

Neste capítulo procede-se à caracterização dos sedimentos coesivos, quanto à sua constituição e às propriedades que influenciam os processos de erosão, transporte e deposição.

#### **2.1.1. Constituição e propriedades gerais**

Os sedimentos encontrados na maioria dos estuários são sedimentos coesivos, também conhecidos por lodos. Este tipo de sedimentos caracteriza-se como uma mistura de frações de sedimentos finos (argilas e siltes), matéria orgânica de natureza diversa, água salgada ou salobra e, nalguns casos, sedimentos grosseiros, como areias finas.

Consideram-se os sedimentos grosseiros quando o diâmetro das partículas é superior a 63  $\mu\text{m}$  e sedimentos finos as partículas inferiores a 63  $\mu\text{m}$ . De entre os sedimentos finos, estes podem dividir-se em siltes grosseiros (20 a 63  $\mu\text{m}$ ), siltes médios (6 a 20  $\mu\text{m}$ ), siltes finos (2 a 6  $\mu\text{m}$ ) e argilas (<2  $\mu\text{m}$ ). Os sedimentos coesivos apresentam uma percentagem de argila superior a 10%, ou seja, incluem material de natureza mineralógica argilosa (Costa 1995).

As argilas, em termos mineralógicos são constituídas por filossilicatos de alumínio hidratados, como caulinite, illite, clorite e esmectite. A sua estrutura química é do tipo folhas, composta por camadas de tetraedros de sílica e hidróxido de alumínio fracamente ligadas por iões metálicos e moléculas de água.

A matéria orgânica encontrada nos sedimentos coesivos pode ter diferentes origens e formas moleculares. Este tipo de matéria desempenha um importante papel na formação de agregados e nas ligações de partículas minerais.

Desta forma, os sedimentos coesivos são compostos por partículas de pequenas dimensões, que apresentam uma área específica suficientemente grande para que o efeito das forças físico-químicas entre elas seja tão importante quanto o efeito da gravidade (Costa, 1995). Ou seja, as forças interpartículas podem dominar o comportamento do sedimento. Em geral, quanto mais fino for o grão, mais coeso é o sedimento.

Os sedimentos coesivos podem encontrar-se em quatro estados: suspensão no meio líquido, elevadas concentrações junto ao fundo, parcialmente consolidado ou consolidado no fundo.

Este tipo de sedimentos é muitas vezes uma preocupação nos cursos de água por influenciarem a qualidade da água. A nível ambiental, têm a capacidade indesejada de adsorverem poluentes, como metais pesados, pesticidas e nutrientes. Causam ainda turbidez na água o que limita a penetração de

luz solar, diminuindo a fotossíntese e a disponibilidade de alimento, o que afeta a vida aquática. Em termos económicos, o problema da turbidez aumenta o custo do tratamento da água. Outro efeito negativo dos sedimentos coesivos diz respeito à ocorrência de assoreamentos nos portos, obrigando a frequentes dragagens.

Uma das propriedades dos sedimentos coesivos, em suspensão, é a capacidade de se agruparem ou agregarem, produzindo partículas de maiores dimensões designadas por flocos ou agregados. A este fenómeno dá-se o nome de floculação.

### **2.1.2. Floculação**

A floculação é a consequência de junção de duas ou mais partículas quando estas se aproximam. Os processos envolvidos são: colisão e a coesão entre as partículas (Mehta, 1984 *in* Costa, 1995).

A colisão das partículas depende essencialmente da concentração da suspensão e das condições de turbulência. Existem três mecanismos de colisão: i) movimento das partículas – efeito Browniano; ii) gradientes de velocidades do fluido; iii) diferentes velocidades de sedimentação das partículas e flocos – sedimentação diferencial.

O efeito browniano é o movimento aleatório de partículas num fluido como consequência dos choques entre todas as moléculas presentes no fluido. Para partículas de diâmetros inferiores a 2  $\mu\text{m}$  é o mecanismo de colisão mais importante, sendo por isso o responsável pelo início da floculação. Forma agregados com textura rugosa.

Quando as partículas apresentam diâmetros maiores, o efeito dos gradientes de velocidades é o mecanismo dominante (van Leussen e Dronkers, 1988 *in* Costa, 1995). Forma agregados esféricos e os mais resistentes dos três mecanismos.

A sedimentação diferencial é o mecanismo mais eficaz em períodos de fracas correntes e onde há elevadas concentrações de sedimentos, onde as tensões de corte são pequenas. Forma agregados rugosos, fracos e de baixa densidade.

O tamanho dos flocos formados pela colisão aumenta até um determinado limite, estando limitado pela tensão de corte que os flocos conseguem suportar.

Para além da tensão de corte, a dimensão máxima que um floco pode atingir depende das características físicas e químicas das partículas, de parâmetros hidráulicos, tais como a turbulência e a velocidade de escoamento, e ainda da composição química e iónica do sedimento (Whitehouse et al., 2000).

O número de colisões entre partículas pode ser estimado através de um modelo simplificado expresso na equação (2.1). Este modelo pressupõe que a colisão entre duas partículas resulta na formação de uma terceira cujo volume é igual à soma dos volumes das partículas iniciais.

$$N_{ij} = K(d_i, d_j)n_i n_j \quad (2.1)$$

Onde,  $N_{ij}$  é o número de colisões por unidade de tempo e de volume entre duas classes de partículas de diâmetro  $d_i$  e  $d_j$ ,  $n_i$  e  $n_j$  são as concentrações das duas classes de partículas e  $K(d_i, d_j)$  é a função da frequência de colisão. Esta função depende do tamanho das partículas, das propriedades do sistema (temperatura e pressão) e do mecanismo que provocou a colisão.

Apenas parte das colisões são eficazes, pelo que se pode acrescentar o coeficiente de estabilidade  $\alpha$  (percentagem de colisões eficazes) à equação (2.2). O valor de  $\alpha$  varia de 0 a 1.

$$N_{ij} = \alpha K(d_i, d_j)n_i n_j \quad (2.2)$$

A coesão entre partículas ocorre quando as forças electrostáticas são maiores que as forças de repulsão geradas pela nuvem de catiões em torno de cada partícula, que dependem da carga dos minerais e da quantidade de catiões existentes no fluido (Whitehouse et al., 2000).

A maior parte das pequenas partículas de argila presentes em águas naturais têm carga negativa. Esta carga negativa, segundo a teoria de dupla camada, é contrabalançada por uma nuvem de catiões (iões positivos) à sua volta. Quando duas partículas se aproximam, a carga igual das duas nuvens provoca repulsão electrostática mas, devido às forças atrativas de van der Waals, existe também atração entre elas a curta distância. Quanto maior for a concentração de catiões na água mais comprimida é a nuvem. Assim, as partículas aproximam-se o suficiente passando as forças atrativas a sobrepor-se às forças repulsivas, ocorrendo a floculação. Desta forma a salinidade da água tem uma importante influência na agregação das partículas. Na água doce, dominam as forças de repulsão, uma vez que tem poucos iões positivos. Já a água salgada tem uma elevada concentração de iões de sódio ( $\text{Na}^+$ ), que são iões positivos fortes (van Rijn, 1993).

## 2.2. Deposição

Mehta e Partheniades (1973) realizaram estudos de laboratório e concluíram que deposição de sedimentos coesivos em suspensão depende da tensão de corte no fundo, processos de turbulência na zona perto do fundo, velocidade de sedimentação, tipo de sedimento, profundidade do escoamento, concentração e constituição iónica da suspensão fluida (Mehta e Partheniades, 1973 in Huang et al., 2006).

Entende-se por suspensão uniforme quando os sedimentos em suspensões têm propriedades uniformes e uma única velocidade de sedimentação. Estes sedimentos quando suspensos com uma determinada concentração inicial ( $C_0$ ) e em movimento para uma determinada velocidade de escoamento (alta), vão depositar para velocidades mais baixas na razão  $C_f/C_0$ , onde  $C_f$  é a concentração residual que corresponde a uma dada tensão e independente de  $C_0$  (Krone, 1962 *in* Costa, 1995).

$$C_f/C_0 = e^{-\frac{w_s p t}{h}} \quad (2.3)$$

Onde  $h$  é a altura de escoamento,  $w_s$  a velocidade de sedimentação e  $t$  o tempo. A variável  $p$  designa-se por probabilidade de deposição. Também podendo ser considerada como a probabilidade das partículas de sedimento aderirem ao fundo e não serem arrastadas pelo fluxo. Com efeito, parte dos sedimentos depositados no fundo podem não suportar as tensões de corte no fundo, sofrerem um processo de desagregação e serem ressuspensos.

A probabilidade de deposição é dada por

$$p = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,total}} \quad \tau \leq \tau_{d,total} \quad (2.4)$$

A deposição ocorre quando a tensão de corte no fundo é inferior a uma determinada tensão de corte crítica de deposição. No entanto, apenas os agregados com força de corte suficiente para resistir às tensões de corte perturbadoras na região do fundo irão depositar e aderir ao fundo (Huang et al., 2006).

Quando a tensão de corte no fundo ( $\tau_d$ ) é inferior à tensão de corte crítica de deposição total ( $\tau_{d,total}$ ), todas as partículas do sedimento e flocos vão depositar. Krone formatou a equação (2.5) que traduz a taxa de deposição ( $D$ ) (Costa, 1995).

$$D = p w_s c \quad \tau \leq \tau_{d,total} \quad (2.5)$$

A tensão de corte crítica para a deposição total dos sedimentos coesivos foi encontrada através de diversos ensaios realizados por Krone (1962). Os valores variam entre 0,06 a 1,1 N/m<sup>2</sup>, dependendo do tipo de sedimento e concentração (Huang et al., 2006).

Por outro lado, existe deposição parcial quando a tensão de corte no fundo é superior à tensão de corte crítica para a deposição total, mas menor que a tensão de corte crítica para a deposição parcial ( $\tau_{d,parcial}$ ).

Neste intervalo de tensões de corte no fundo, os flocos fortes depositam e os flocos fracos são ressuspensos.

Não há deposição quando a tensão de corte no fundo é superior à tensão de corte crítica para a deposição parcial. Neste caso, a taxa de deposição é igual a zero:

$$D = 0 \quad \tau \geq \tau_{d,parcial} \quad (2.6)$$

Contudo, dado que os valores da tensão de corte crítica de deposição total e parcial não são bem compreendidos, são frequentemente utilizados como parâmetros de calibração para determinar a taxa de deposição (Huang et al., 2006).

Para sedimentos não uniformes (sedimentos de diversos tamanhos e conseqüentemente diferentes velocidades de sedimentação) a deposição depende da tensão de corte no fundo e das propriedades iniciais de cada classe de sedimento.

A taxa de deposição é calculada como resultado da soma dos fluxos de todas as classes de sedimentação (Mehta et al., 1989 *in* Costa, 1995).

$$D = \sum_{i=1}^n p_i w_{s_i} c_i \quad (2.7)$$

Onde,  $p_i$  é a probabilidade de deposição da classe  $i$ ,  $w_{s_i}$  a velocidade de sedimentação da classe  $i$  e  $c_i$  a concentração de sedimentos em suspensão da classe  $i$ .

A deposição completa ocorre quando a tensão de corte no fundo é inferior a uma tensão de corte crítica para a deposição total ( $\tau_{d,total}$ ).

### 2.3. Erosão

A estrutura dos fundos dos estuários formados por materiais coesivos varia com o tempo. As suas espessuras ativas têm entre  $10^{-2}$  e 1 m e podem ser divididas em zona superficial e zona consolidada (Parchure e Mehta, 1985 *in* Costa, 1995).

A zona superficial (ou zona superior) caracteriza-se por apresentar uma estratificação em profundidade onde quanto mais à superfície menor é a resistência e a consolidação do material depositado. No entanto, a resistência de corte do fundo aumenta com a profundidade devido às alterações físico-químicas associadas à sobrecarga. Ao sobrecarregar os materiais depositados, com o passar do tempo, estes tornam-se mais densos e resistentes formando a zona consolidada (ou zona inferior). Esta zona apresenta propriedades relativamente uniformes com a profundidade.

A erosão de sedimentos pode ocorrer de modo superficial ou em massa. A erosão superficial, também conhecida por erosão floco a floco, é o mecanismo de erosão mais comum nos estuários.

Ocorre quando as forças hidrodinâmicas são superiores às ligações coesivas, às forças de atrito e à força da gravidade. Estas forças hidrodinâmicas fazem com que os flocos se separem do fundo de forma individual sendo ressuspensos.

Por outro lado, a erosão em massa consiste no destacamento de grandes porções do fundo que são mobilizadas quase instantaneamente em grandes massas.

A resistência à erosão é influenciada por fatores como temperatura do leito, pH, teor de água e gás, tipo de sedimento, salinidade e espécies iônicas no fluido intersticial, que controlam a permeabilidade. De uma forma geral, a resistência do fundo à erosão pode ser afetada por quaisquer fatores que alterem a ligação eletroquímica entre partículas ou que influenciem a produção de secreções biológicas que estabilizam o fundo (Costa, 1995).

A erosão pode ser quantificada a partir da taxa de erosão ( $E$ ). Quando o fundo tem densidade constante e, conseqüentemente, tensão de erosão ( $\tau_e$ ) constante considera-se a equação (2.8) (Partheniades, 1965 *in* van Rijn, 1993).

$$E = M \left( \frac{\tau_e}{\tau_{ce}} - 1 \right) \quad \text{se } \tau_e \geq \tau_{ce} \quad (2.8)$$

$$E = 0 \quad \text{se } \tau_e < \tau_{ce} \quad (2.9)$$

A taxa de erosão expressa-se em  $\text{kg/m}^2/\text{s}$ . O coeficiente de erosão  $M$  ( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ ) depende de parâmetros físico-químicos, que determinam as forças inter-partículas características dos sedimentos coesivos, tais como composição mineral, teor de matéria orgânica, salinidade, etc.  $M$  toma valores entre 0,00001 e 0,0005  $\text{kg/m}^2/\text{s}$  para lamas naturais pouco consolidadas (Van Rijn, 1993). A tensão crítica para a erosão ( $\tau_{ce}$ ) relaciona-se com a consolidação do sedimento e densidade deste.

Quando o fundo é estratificado, a tensão de erosão não é constante, ou seja, verifica-se uma densidade crescente em profundidade. Neste caso, a taxa de erosão é dada por (Parchure e Mehta, 1985):

$$E = E_0 e^{[\alpha(\tau - \tau_{ce})^{0.5}]} \quad \text{se } \tau > \tau_{ce}(z) \quad (2.10)$$

$$E = 0 \quad \tau_e < \tau_{ce} \quad (2.11)$$

$E_0$  ( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ ) é o coeficiente designado por taxa de erosão da partícula e toma valores entre 0,00001 e 0,001  $\text{kg/m}^2/\text{s}$  para a caulinite e lama natural em água salgada. O coeficiente empírico  $\alpha$  assume valores de 5 a 30  $\text{m/N}^{0.5}$ .

Os valores para a tensão crítica de erosão podem ser determinados em laboratório, embora a interpretação dos resultados tenha sido considerada subjetiva. Para fundos estuarinos pouco consolidados, a tensão crítica toma valores na gama de 0,1 a 2 Pa (Berlamont et al., 1993). Mas pode

variar de quase zero para flocos orgânicos a 10 Pa para solos muito duros (Mehta, 1991 *in* Costa, 1995).

## 2.4. Estudos em canal anular

Depois de vários estudos sobre a deposição de sedimentos coesivos em águas paradas, surgiu a necessidade de estudar o transporte de sedimentos em águas correntes. Dá-se então início a estudos em canal anular onde é possível reproduzir um escoamento, induzindo tensões de corte no fundo e simulando as correntes existentes em estuários.

Exemplo de um desses estudos foi o de Delo (1988) que, utilizando um canal anular, estudou a deposição de sedimentos coesivos para diferentes valores de tensão de corte no fundo e também para diferentes valores de salinidade da suspensão.

Delo realizou ensaios com três salinidades diferentes (32‰, 5‰ e zero) para a mesma concentração de sedimentos finos em suspensão ( $\sim 1 \text{ kg/m}^3$ ). Em cada um dos ensaios, variou a tensão de corte de fundo de hora a hora, iniciando com uma tensão de  $0,57 \text{ N/m}^2$  e reduzindo-a para  $0,36 \text{ N/m}^2$ ,  $0,07 \text{ N/m}^2$  e  $0,0 \text{ N/m}^2$  sucessivamente.

Os resultados obtidos por Delo são ilustrados nas Figuras 1, 2 e 3.

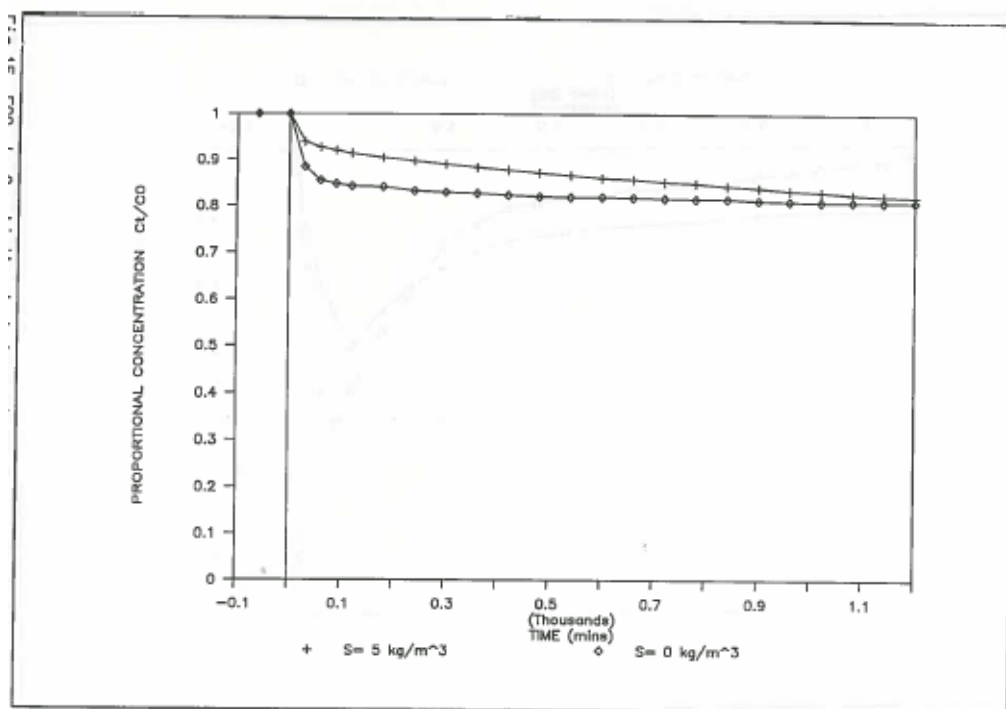


Figura 1 – Efeito da salinidade no estudo de Delo (1988): tensão de corte no fundo =  $0,36 \text{ N/m}^2$ ,  $C_0 \approx 1,0 \text{ kg/m}^3$  (adapt. de Delo (1988)).

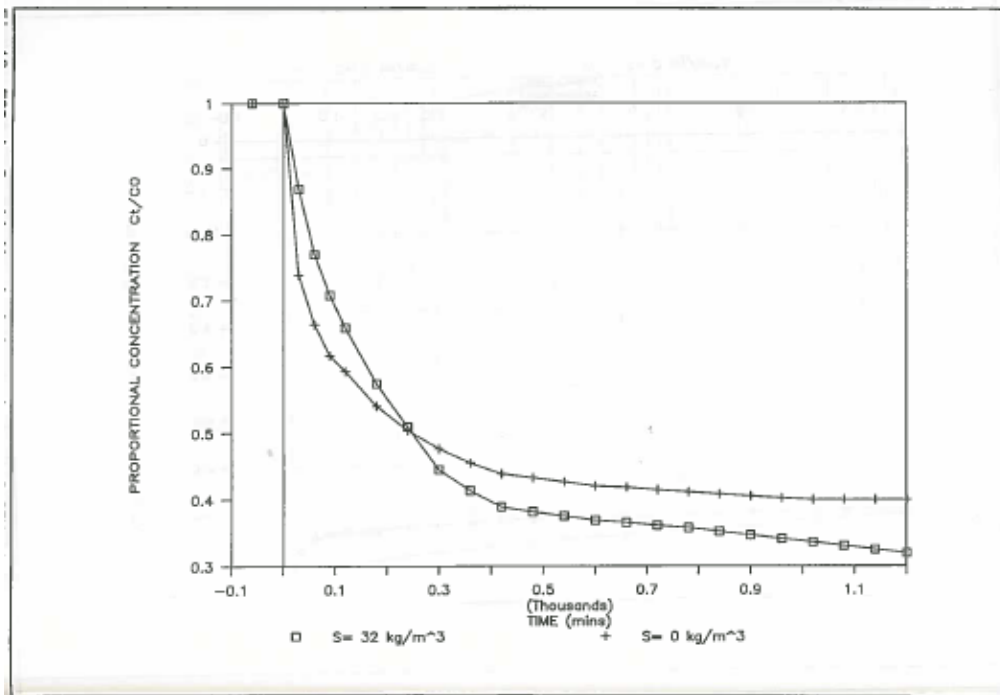


Figura 2 - Efeito da salinidade no estudo de Delo (1988): tensão de corte no fundo =  $0,07 \text{ N/m}^2$ ,  $C_0 \approx 1,0 \text{ kg/m}^3$  (adapt. de Delo (1988)).

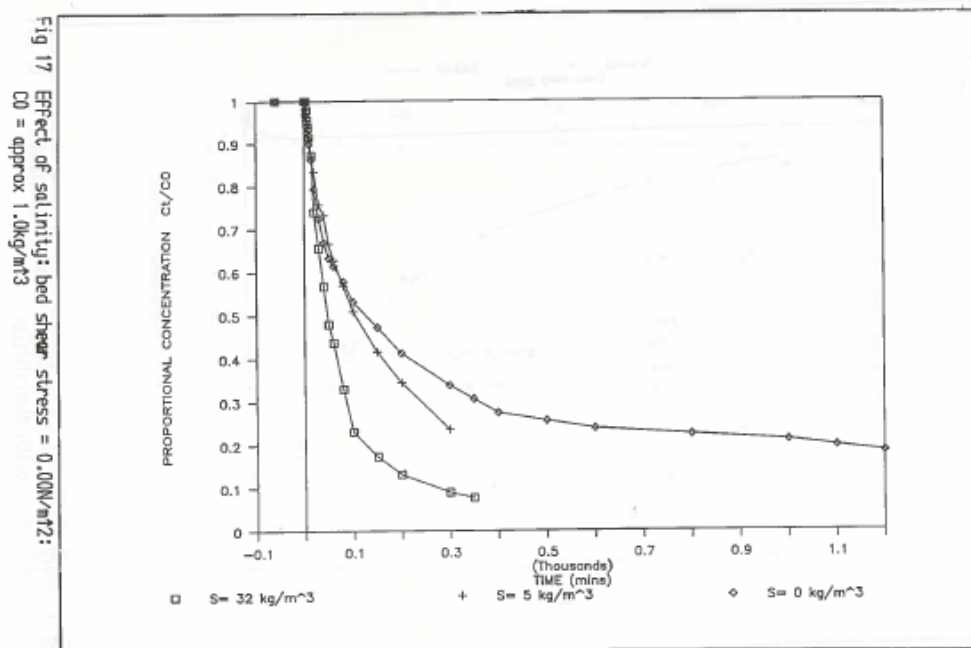


Fig 17 Effect of salinity: bed shear stress =  $0.00 \text{ N/m}^2$ :  $C_0 = \text{approx } 1.0 \text{ kg/m}^3$

Figura 3 - Efeito da salinidade no estudo de Delo(1988): tensão de corte no fundo =  $0,00 \text{ N/m}^2$ ,  $C_0 \approx 1,0 \text{ kg/m}^3$  (adapt. de Delo (1988)).



Os resultados não apresentam um padrão consistente sobre a deposição dos sedimentos suspensos (Delo, 1988). No entanto, pode notar-se, por exemplo, que para a tensão de corte no fundo de  $0,36 \text{ N/m}^2$  (Figura 1), a deposição para salinidade zero ocorre com mais expressão e a um ritmo mais rápido que a deposição na suspensão com 5‰ de salinidade. E que para a tensão de corte no fundo igual a  $0,07 \text{ N/m}^2$  (Figura 2), a suspensão com salinidade zero deposita mais rápido, mas com uma concentração de equilíbrio mais elevada que a suspensão com salinidade igual a 32‰.

Delo conclui que o efeito da salinidade na deposição de sedimentos coesivos é mais expressivo quando esta ocorre em condições de repouso, sendo proporcional à salinidade da suspensão.

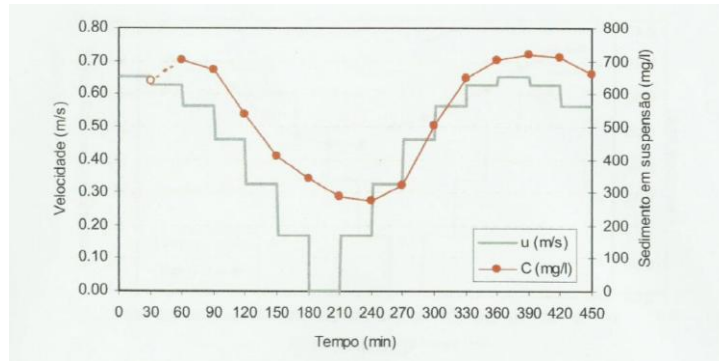
Em 2010 foi realizado, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no âmbito do projeto “Murano – Muros das Marinhas de Sal da Ria de Aveiro” (Portela e Brito, 2010), um estudo em canal anular denominado “Deposição e Erosão de Sedimentos do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro”. O trabalho consistiu na realização de ensaios que pretendiam analisar a evolução das concentrações de sedimento em suspensão para diferentes condições de velocidade média de escoamento e de tensão de corte no fundo.

Efetuaram-se 3 ensaios de curta duração (7 horas e 30 minutos) com evolução da velocidade do escoamento comparável a condições observáveis num ciclo de maré, mas com diferentes valores máximos atingidos. E dois ensaios de longa duração (11 dias) com alteração de velocidade ao fim de períodos sucessivos de 24 horas apenas. O ensaio 5 foi uma repetição do ensaio 4, de forma a avaliar a robustez dos resultados. Estes ensaios foram realizados com água doce sob as condições apresentadas na Figura 4.

Ensaio	Duração	Velocidade máxima (m/s)	Tensão de corte máxima (Pa)
1	7,5 horas	0,65	0,68
2	7,5 horas	0,50	0,40
3	7,5 horas	0,35	0,20
4	11 dias	0,66	0,70
5	11 dias	0,66	0,70

**Figura 4 – Condições de ensaio do estudo da Ria de Aveiro (adapt. de Portela e Brito (2010)).**

Os resultados obtidos num dos ensaios de curta duração (Ensaio 1) para a evolução temporal da concentração de sedimento em suspensão são apresentados na Figura 5.



**Figura 5 – Evolução da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de curta duração. Ensaio 1: velocidade 0,65 m/s (adapt. de Portela e Brito (2010))**

Os outros dois ensaios, realizados com velocidades máximas de 0,50 m/s e 0,35 m/s, apresentam andamento semelhante e como seria de esperar, as concentrações decrescem na fase de velocidade decrescente (deposição) e aumentam na fase de velocidade crescente (erosão). No entanto, o instante de concentração mínima não coincide com o instante de velocidade mínima, mas sim ocorre mais tarde. Concluiu-se que devido à baixa velocidade de sedimentação e ao curto período de tempo em que a velocidade de escoamento é baixa ou nula, cerca de 40% do sedimento permanece continuamente em suspensão.

## 2.5. Ciclo de marés

Pode-se definir maré como a subida e descida dos níveis da água do mar causada principalmente pela interferência das forças gravitacionais da Lua e do Sol sobre a Terra. A maré constitui uma onda de grande comprimento de onda gerando deslocamento de massas líquidas (correntes) e consequentemente velocidades de escoamento, que nos estuários são frequentemente importantes.

O ciclo de marés é caracterizado pela preia-mar (maré cheia) e baixa-mar (maré vazia). Em Portugal as marés são semidiurnas, isto é, ocorrem duas preia-mares e duas baixa-mares por dia. Cada ciclo tem a duração de 12 horas e 25 minutos aproximadamente.

A marés ao encher até atingir a preia-mar ou ao vazar até atingir a baixa-mar produzem correntes de enchente ou de vazante, respetivamente, denominadas correntes de maré. As situações de maré cheia e de maré vazia tendem a ser instantes de velocidade nula, enquanto as máximas velocidades tendem a ocorrer a meia vazante e a meia enchente.

A cada 15 dias verificam-se amplitudes máximas e mínimas coincidentes com as fases da Lua. Aquando da Lua Cheia ou Lua Nova, mais precisamente um ou dois dias após cada uma destas fases da Lua, verificam-se as amplitudes de maré máximas. Às marés de maior amplitude dá-se o

nome de marés vivas. As amplitudes mínimas de maré ocorrem um ou dois dias após o Quarto Crescente e o Quarto Minguante e denominam-se marés mortas.

Consequentemente, nas marés vivas as velocidades da corrente durante a enchente e a vazante são maiores e nas marés mortas são menores.



### 3. Caso de estudo: Porto de Lisboa

#### 3.1. Localização e caracterização

O Porto de Lisboa é um grande porto europeu de orientação atlântica e o principal terminal de transporte marítimo de Portugal, com excelentes características de acesso e abrigo. Está localizado no estuário do Tejo, um dos maiores estuários da Europa. A sua bacia líquida estende-se por quase 80 km e tem uma área total de 32 mil hectares, o que lhe permite receber navios de qualquer porte. A centralidade geoestratégica do Porto de Lisboa coloca-o nas principais rotas do comércio internacional, conferindo-lhe um estatuto de extrema importância nas cadeias logísticas de comércio e nos principais circuitos de cruzeiros (Pereira e Ramos, 2014).



Figura 6 – Estuário do Tejo

Diariamente o estuário do Tejo assiste a circulação de navios de cruzeiro, navios e embarcações de transporte de mercadorias, navios em situação de reparação ou prestação de outros serviços (estaleiros, abastecimento, recolha de resíduos, etc), embarcações de transporte fluvial de passageiros, embarcações de recreio náutico e desporto, embarcações de atividade marítimo-turística e embarcações de pesca.

É, por isso, necessário garantir as condições de navegabilidade nos canais de acesso e a manutenção da profundidade nas bacias de manobra e de estacionamento. No entanto, as condições hidrodinâmicas e de dinâmica sedimentar existentes no estuário não são as mais favoráveis. Sendo o fundo do estuário composto predominantemente por sedimentos coesivos, são facilmente transportados por ação das marés. Devido ao transporte e deposição destes sedimentos, são necessárias dragagens anuais de cerca de  $0,9 \times 10^6 \text{ m}^3$  para manter boas condições portuárias. As dragagens têm impactos económicos e ambientais.

### 3.2. Dragagens no estuário do Tejo

Dragagem é um serviço de desassoreamento, alargamento, desobstrução, remoção, derrocamento ou escavação do material do fundo de rios, lagoas, mares, baías e canais de acesso a portos. Assim, o principal objetivo de uma dragagem é a manutenção e/ou aumento da profundidade. As dragagens são efetuadas por dragas, que podem ser de vários tipos.

No caso do estuário do Tejo, as dragagens são necessárias para manter a navegabilidade necessária para todo o tipo de atividade que o rio Tejo recebe diariamente. Sendo o Porto de Lisboa um gestor e utilizador no estuário do Tejo é a APL (Administração do Porto de Lisboa) que assume a responsabilidade dos serviços de manutenção de navegabilidade, executados pela própria APL ou por terceiros ([www.portodelisboa.pt](http://www.portodelisboa.pt)).

Um projeto de dragagens, para a APL, deve incluir os seguintes elementos:

- Levantamento hidrográfico atualizado com definição da área a dragar;
- Cotas de dragagem;
- Equipamento de dragagem a utilizar;
- Estimativa do volume a dragar;
- Em caso de se pretender dragar até junto do cais é necessária a planta com o perfil da estrutura.

Outro aspeto muito importante numa ação de dragagens é o local de imersão dos sedimentos dragados. É necessário um estudo prévio acerca da contaminação dos sedimentos a dragar e do seu local de imersão de modo a minimizar os impactos ambientais.

No caso do estuário do Tejo, existem 3 locais de imersão de sedimentos não contaminados em frente a Algés, a Alcântara e ao Poço do Bispo. Na Figura 7, adaptada de Cabral (2010), é possível ver os locais de dragagem e de imersão de sedimentos no estuário do Tejo.

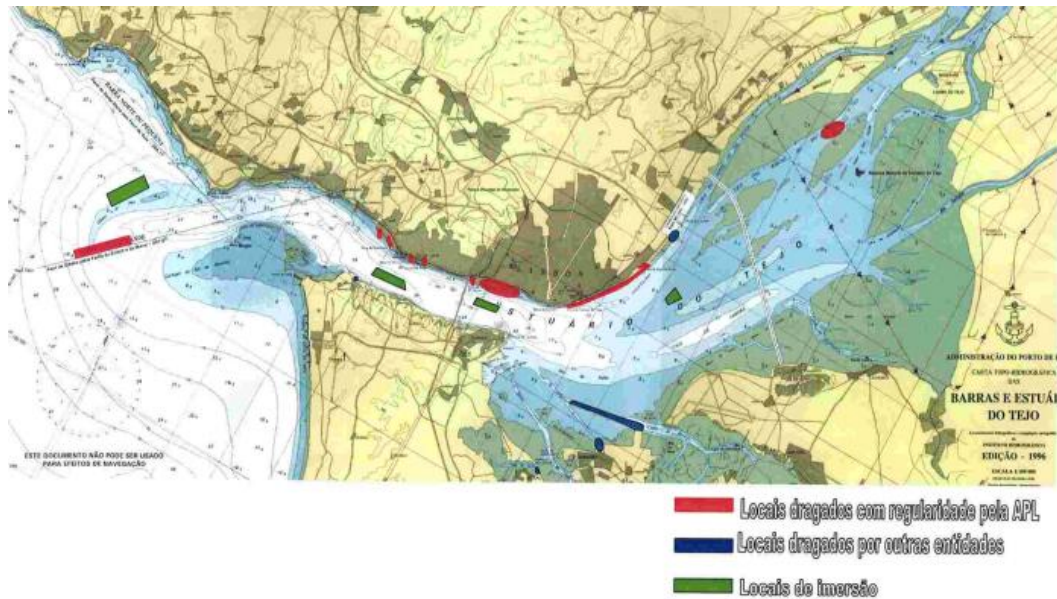


Figura 7 - Locais de dragagem e de imersão de sedimentos no estuário do Tejo (adapt. de Cabral (2010)).

A APL efetua, com regularidade, a caracterização dos sedimentos existentes no Rio Tejo, nomeadamente nas zonas sujeitas a dragagens de manutenção. Os sedimentos dragados no estuário estão classificados por classes, segundo o seu grau de contaminação (classe 1, classe 2 e classe 3), tendo cada classe um local próprio de imersão.

A 14 de setembro de 2015, o jornal de negócios da indústria e construção, *Construir*, avançou com a notícia que a APL “vai investir 7,9 milhões de euros nos trabalhos de dragagens de manutenção de fundos de acesso, bacias de manobra e de estacionamento e Docas do Porto de Lisboa”. Trata-se de uma empreitada que “consiste na realização de dragagens de manutenção de fundos, constituídos predominantemente por aluviões lodo arenosos, em diversos locais do Estuário do Tejo, com especial incidência geográfica na margem norte entre Algés e o Poço do Bispo, sendo que as cotas de dragagem variam conforme os locais desde -2m a -3m (zh) nas docas ou abrigos ou canais até -17,5m (zh) no Canal da Barra. Estima-se em 2.650.000m<sup>3</sup> o volume de sedimentos a dragar” num período de três anos (www.construir.pt).

Pode assim concluir-se que o impacto económico e ambiental das dragagens é grande e que requer das entidades intervenientes uma constante monitorização e mitigação do problema associado ao transporte de sedimentos finos.

### 3.3. Velocidades de escoamento e salinidade

A velocidade de escoamento máxima, originada pelas correntes de maré, observada no estuário do Tejo é de cerca de 2 m/s na zona da embocadura e aquando das marés vivas. Na zona intermédia do estuário e nos principais canais a velocidade de escoamento máxima é cerca de 1 m/s (Franz et al., 2014).

Quanto à salinidade, esta varia de acordo com maré, com valores típicos entre 25 e 30‰ na zona da Marina do Parque das Nações (Portela et al., 2013).

### **3.4. Marina do Parque das Nações**

A Marina do Parque das Nações, na margem direita do rio Tejo, a sul da foz do Trancão e da doca de Cabo Ruivo, é um dos locais afetados pelo transporte e deposição de sedimentos coesivos. Trata-se de uma zona onde depositam muitos sedimentos finos que levam à formação de banquetas bem visíveis na baixa-mar. A recolha do sedimento para estudo foi feita nesta marina por ser um local de fácil acesso, onde é possível ter zonas do fundo emersas onde o tipo de sedimento é em tudo semelhante ao existente nas restantes zonas do estuário do Tejo.



## 4. Metodologia

### 4.1. Colheita do sedimento

O sedimento foi colhido na Marina do Parque das Nações, estuário do Tejo, no dia 21 de Novembro de 2013. A colheita foi realizada na zona do cais de espera, no anteporto, pelas 11 horas uma vez que a maré baixa nesse dia foi às 10h53 min com uma altura de 0,98 m, o que permitiu ter zonas do fundo emersas, facilitando a colheita. O material utilizado foi apenas uma pá e sacos de plástico onde se colocou o sedimento. Colheram-se 4 sacos de forma a obter uma massa superior a 3 kg de sedimento. Após a colheita, os sacos foram devidamente fechados e transportados para o laboratório do Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras do LNEC.



Figura 8 – Marina do Parque das Nações

### 4.2. Preparação da suspensão

No dia 22 de Novembro de 2013 foi realizada a preparação de uma amostra onde se diluiu o sedimento natural para obter uma suspensão concentrada.

Utilizou-se cerca de 3 kg de sedimento que foi previamente passado por um peneiro de 1 mm de modo a remover o material muito grosseiro e obter uma suspensão com concentração elevada. Seguidamente procedeu-se à diluição na proporção de 2 partes de sedimento natural para 1 parte de água. Ou seja, juntou-se 3 dm<sup>3</sup> de sedimento a 1,5 dm<sup>3</sup> de água, fazendo um volume total de suspensão concentrada de 4,5 dm<sup>3</sup>.

Seguidamente foram colhidos 2 ml desta suspensão concentrada e calculada a concentração de sedimento natural pelo método gravimétrico. Obteve-se uma concentração de 315 g/l.

Dado o volume de suspensão indicado, a massa de sedimento disponível seria 1417,5 g.

Estabeleceu-se, como objetivo, que a concentração máxima nos ensaios deveria ser 0,900 g/l. Sendo o volume do canal 1395 dm<sup>3</sup>, calculou-se que seria necessário introduzir no canal uma massa de 1256 g. Esta massa corresponderia a um volume de suspensão concentrada de 3,99 dm<sup>3</sup>.

### 4.3. Análise granulométrica

Para análise da granulometria dos sedimentos coesivos, recorreu-se à difração laser. Para tal, utilizou-se um difratômetro Malvern Mastersizer Micro (Figura 9). A difração laser é uma técnica amplamente utilizada para determinação do tamanho de partículas para materiais que vão desde centenas de nanômetros a vários milímetros de tamanho. Permite medições rápidas de resposta instantânea e não necessita de calibração, tendo assim alta produtividade de amostras. Trata-se de uma técnica bem estabelecida e coberta pela norma internacional ISO13320 (2009).



Figura 9 - Difratômetro Malvern Mastersizer Micro

#### 4.3.1. Método de difração laser

A difração laser mede as distribuições de tamanho das partículas por medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra. Partículas grandes dispersam a luz em pequenos ângulos em relação ao feixe de laser e partículas pequenas dispersam a luz em ângulos grandes. Esta técnica considera que as partículas têm sempre forma esférica e que o padrão da dispersão do conjunto das partículas é igual à soma dos padrões de dispersão de cada partícula quando sujeitas ao feixe luminoso incidente. O tamanho das partículas é indicado como o diâmetro de uma esfera de volume equivalente (Ramos, 2013).

### 4.3.2. Difrátometro laser

O aparelho de difração laser tem como objetivo analisar a granulometria de partículas num líquido com dimensões entre 0,31 e 301  $\mu\text{m}$ . Utilizou-se o analisador Mastersizer Micro do fabricante Malvern Instruments, que é constituído por uma unidade ótica e um computador com o software Mastersizer Micro v2.19, que permitirá processar os dados. Este aparelho é constituído por uma unidade de amostragem, um painel de controlo e uma célula de medição. A suspensão é homogeneizada na unidade de amostragem que promove a circulação da amostra na célula de medição. Esta unidade é constituída por: um misturador, responsável pela circulação da mistura e dispersão das partículas; uma bomba que induz a rotação do misturador; uma sonda ultra-sons, que quebra os aglomerados de partículas ajudando na dispersão da amostra; um braço de bombagem, que suporta a bomba, o misturador e a sonda; e uma alavanca do braço de bombagem que permite mover verticalmente o braço de bombagem (Ramos, 2013). O esquema do aparelho é ilustrado na Figura 10.

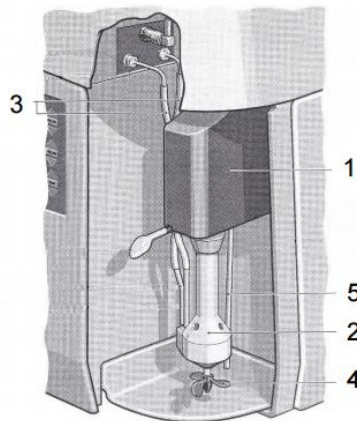


Figura 10 – Esquema da unidade e amostragem do difratómetro Malvern Mastersizer Micro: (1) braço de bombagem; (2) bomba; (3) tubos de circulação; (4) misturador; (5) sonda ultra-sons; (adapt. Freire, 2003).

### 4.4. Descrição do canal

O canal onde foi realizada a experiência denomina-se canal anular. Em planta, tem um formato circular de 4m de diâmetro exterior e 3,4 m de diâmetro interior, uma secção de 0,30 m de largura e 0,40 m de altura, sendo o seu volume líquido igual a 1395  $\text{dm}^3$ . Esta forma circular permite evitar as singularidades de entrada e saída dos canais retangulares, sendo adequada para o estudo dos processos de transporte de sedimentos finos. O canal é constituído por um canal-base, de paredes transparentes e por um anel superior que contacta o fluido (Figura 11).



Figura 11 – Canal anular do LNEC

O canal tem associado a si motores que imprimem movimentos de rotação independentes e de sentidos opostos ao canal-base e ao anel superior. Esta característica minimiza a importância das circulações secundárias. O movimento do canal é controlado por um quadro elétrico que permite o aumento ou diminuição da velocidade tanto da base como do anel superior. O movimento é introduzido sob a forma de frequência (em Hertz).

O canal anular possuía um instrumento ótico para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão a partir da turvação (OSLIM), que à data do trabalho experimental encontrava-se inativo. Por isso, tal como será descrito mais adiante, procedeu-se a recolhas manuais de amostras para a determinação da concentração por gravimetria em cada momento da experiência.

Neste estudo, os ensaios foram realizados conservando a base imóvel, sendo o escoamento no interior do canal promovido apenas pela rotação do anel superior. Isto significa que não se adotou uma relação entre as velocidades angulares do anel ( $w_t$ ) e da base ( $w_b$ ) que minimizasse as circulações secundárias. Este procedimento teve todavia o mérito de simplificar a colheita de amostras durante os ensaios. A velocidade angular a impor ao anel superior para obter uma determinada velocidade média do escoamento referida à base do canal ( $u_{av,b}$ ) foi estimada pela expressão analítica (Portela e Brito, 2010):

$$u_{av,b} = \left( w_t \frac{r}{1 + \sqrt{\frac{b+2h}{b}}} + w_b \frac{r \sqrt{\frac{b+2h}{b}}}{1 + \sqrt{\frac{b+2h}{b}}} \right) - w_b r \quad (4.1)$$

em que  $r$  é o raio médio do canal e  $b$  e  $h$  são, respetivamente, a largura e a altura da secção do canal. Neste estudo, tal como referido anteriormente, a base do canal foi mantida imóvel pelo que  $w_b$  é igual a zero.

A tensão de corte no fundo foi estimada admitindo uma relação quadrática com a velocidade média do escoamento e uma lei de resistência semi-empírica (por exemplo, Manning) (Portela e Reis, 2004):

$$\tau = \rho u_*^2, \text{ com p. ex., } u_* = u_{av,b} \frac{n g^{1/2}}{h^{1/6}} \quad (4.2)$$

Onde  $\tau$  é a tensão de corte no fundo,  $\rho$  é a massa volúmica da água,  $u_*$  é a velocidade de atrito,  $n$  é o coeficiente de Manning e  $g$  é a aceleração da gravidade. Neste estudo considerou-se um coeficiente de Manning igual a  $0,011 \text{ s m}^{-1/3}$ .

## 4.5. Procedimentos experimentais

### 4.5.1. Preparação dos ensaios

O início dos procedimentos experimentais teve lugar no dia 7 de março de 2014.

Após se ter enchido o canal anular com água doce, completando o seu volume total de  $1395 \text{ dm}^3$ , utilizou-se o sistema Multi-Sonda YSI 556 MPS (Multi-Probe System) para medir a salinidade e temperatura da água quando o canal se encontrava ainda com velocidade nula. Nestas condições, verificou-se que a água possuía uma salinidade igual a  $0,15 \text{ ‰}$  e a temperatura de  $14,3 \text{ °C}$ .

Seguidamente foram retirados  $5 \text{ dm}^3$  de água e colocada a base do canal em movimento a  $7,7 \text{ Hz}$ . Introduziram-se  $4 \text{ dm}^3$  da suspensão concentrada e acrescentou-se o volume de água necessário para que o nível de água ficasse ao nível do anel superior do canal. Com o objetivo de diluir da forma mais eficaz possível a suspensão concentrada na água do canal, deixou-se o canal em movimento contínuo durante os dois dias seguintes com uma velocidade de  $0,52 \text{ m/s}$ , ou seja, a base a funcionar com  $0 \text{ Hz}$  e anel superior a  $31,5 \text{ Hz}$ .



Figura 12 – Amostra concentrada do sedimento



Figura 13 – Canal anular com suspensão do sedimento

#### **4.5.2. Variação de salinidade**

Efetuar-se-ão 5 conjuntos de ensaios cuja única variante foi a salinidade da água. O objetivo é aferir o efeito da salinidade na deposição dos sedimentos. Para tal, o primeiro ensaio foi feito com salinidade aproximadamente igual a zero, isto é, sem adição de sal à suspensão. No entanto, na primeira medição a suspensão apresentava uma salinidade igual a 0,20‰, pois a amostra que veio do campo tinha água salgada e a própria água da torneira não tem salinidade zero.

Para a realização do segundo ensaio adicionou-se 3,5 kg de sal à suspensão no canal, de forma a obter uma salinidade igual a 2,5‰. O sal utilizado foi sal marinho que foi previamente dissolvido em água doce num recipiente e só depois introduzido no canal.

No início do terceiro ensaio foram adicionados mais 3,5 kg de sal para aumentar a salinidade para 5‰ e no quarto ensaio mais 7 kg de sal, com o objetivo de atingir os 10‰ de salinidade.

Por último, antes de se iniciar o quinto ensaio, foram adicionados mais 7 kg de sal de forma a obter 15‰ de salinidade.

#### **4.5.3. Descrição dos ensaios**

Os ensaios consistiram na recolha de amostras em duplicado, 150 ml para determinação da concentração e 200 ml para análise da granulometria a laser. As recolhas foram feitas de forma manual, utilizando-se recipientes onde foram sendo colocadas as amostras. Cada amostra foi identificada com o número e instante do ensaio e finalidade (ex.: E1 – ensaio 1; A1 – amostra 1; C – concentração ou G – granulometria).

A par de cada recolha, procedeu-se à alteração da velocidade do anel superior do canal e reposição do nível da água após a colheita. As diferentes velocidades adotadas serão apresentadas e justificadas mais adiante.

De forma a temporizar os intervalos de colheitas foi utilizado um alarme para que o procedimento fosse rigoroso.

Cada conjunto de ensaios foi realizado em dois dias e pode ser dividido em dois ensaios. No primeiro dia procedeu-se a um ensaio de maré e no segundo dia a um ensaio de deposição.

Nos ensaios de maré a colheita das amostras e a alteração da velocidade do anel superior do canal foram realizadas com intervalos de meia hora. A evolução da velocidade do escoamento foi definida de forma a representar as condições observáveis num ciclo de maré. Inicialmente de forma decrescente, durante 3 horas, até se atingir velocidade nula e depois de forma crescente, também durante 3 horas. Cada um destes ciclos apresentou uma duração de 6 horas e 30 minutos.

A cada período de velocidade nula, procedeu-se sempre à medição da salinidade e temperatura da água com recurso ao sistema Multi-Sonda YSI 556 MPS (Multi-Probe System).

Nos ensaios de deposição, após uma redução súbita de velocidade do escoamento para metade do valor inicial, as amostras foram colhidas com intervalo de tempo variável (por vezes de hora a hora) sem alteração da velocidade durante 8 horas e 30 minutos, ou seja, a velocidade constante.

#### **4.5.3.1. Análise da concentração**

Depois de colhidas as amostras referentes à concentração (do tipo  $E_i - A_i - C_i$ ) procedeu-se à medição do volume, filtração, secagem na estufa e pesagem da suspensão contida em cada um dos recipientes dos filtros com o sedimento.

Cada amostra foi retirada do recipiente com o auxílio de uma pipeta graduada e um pompete, registado o volume e transitada para um copo de vidro. Utilizou-se água destilada para remover todos os resíduos quer do recipiente inicial quer da pipeta. Seguidamente a amostra foi filtrada com recurso à filtração a vácuo. Utilizaram-se filtros de membrana em nitrato de celulose com  $0,45 \mu\text{m}$  de porosidade. Estes filtros foram previamente pesados numa balança analítica de precisão  $0,0001 \text{ g}$ , após terem estado na estufa a  $40^\circ\text{C}$  durante cerca de uma hora.

Após a filtração estar terminada, os filtros foram colocados em caixas de petri e/ou vidros de relógio e colocados novamente na estufa a  $40^\circ\text{C}$  durante 1 hora. Depois de secos, os filtros com o resíduo foram pesados e registou-se o seu peso. Todas as pesagens foram realizadas três vezes, sendo o peso final a média dos três valores obtidos. A pesagem real da amostra é obtida subtraindo o peso do filtro sem resíduo ao peso do filtro com resíduo.

A concentração de cada amostra obtém-se dividindo a massa de sedimento pelo volume de solução da amostra.

#### **4.5.3.2. Análise da granulometria**

A solução utilizada na análise é constituída pela amostra da suspensão do sedimento e por um dispersante. O dispersante utilizado é água destilada, por não dissolver nem alterar as características granulométricas do material a analisar, não ter impurezas e ser fácil de obter. A concentração da solução tem de ser tal que o difractómetro laser meça um valor adequado da obscuração do feixe ótico pela solução.

Antes da análise da solução, é feito um background apenas com água destilada. A obscuração nesta leitura deve ser 0%. Para tal, colocaram-se 800 ml de água destilada à temperatura ambiente num gobelé.

De seguida, com auxílio de uma pipeta, a amostra vai sendo adicionada ao meio dispersivo até atingir um valor entre 10 e 15% de obscuração ou, não chegando a esse valor, utilizar a amostra toda. Quando a solução estabiliza é efetuada a medição. A medição é repetida mais duas vezes.



## 5. Apresentação e discussão de resultados

### 5.1. Concentração e velocidade em função do tempo

Recorda-se que o objetivo dos ensaios é analisar a relação entre a concentração da amostra e a velocidade do escoamento, em função do tempo. Os resultados para os ensaios de maré são apresentados de forma separada dos resultados dos ensaios de deposição.

#### 5.1.1. Ensaios de maré

Apresentam-se os resultados para os cinco ensaios de maré.

O ensaio 1 foi realizado no dia 10 de março de 2014, com início as 9:00. A salinidade medida durante o ensaio foi 0,20‰ e a temperatura 15,4°C.

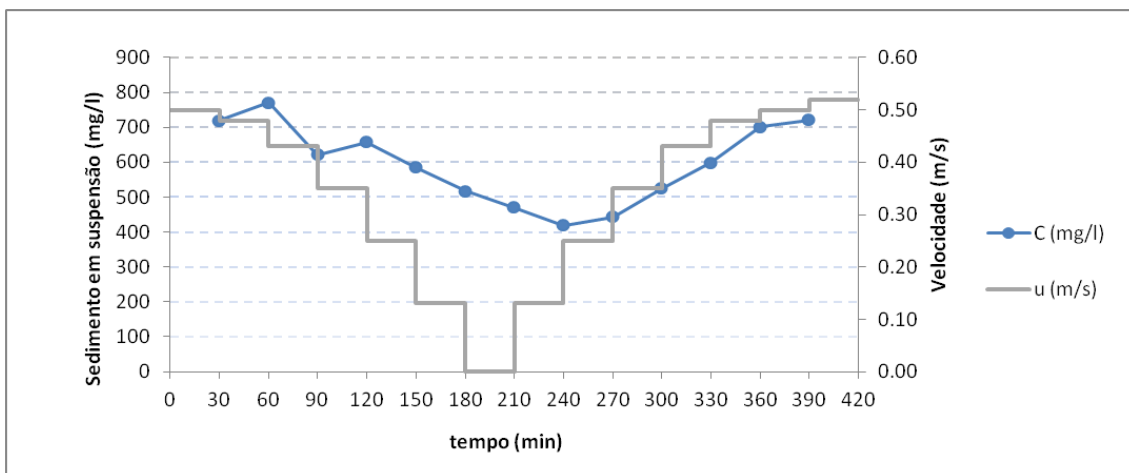


Figura 14 – Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré 1

O ensaio 2 foi realizado no dia 12 de março de 2014, com início as 9:00. A salinidade medida durante o ensaio foi 2,64‰ e a temperatura 15,7°C.

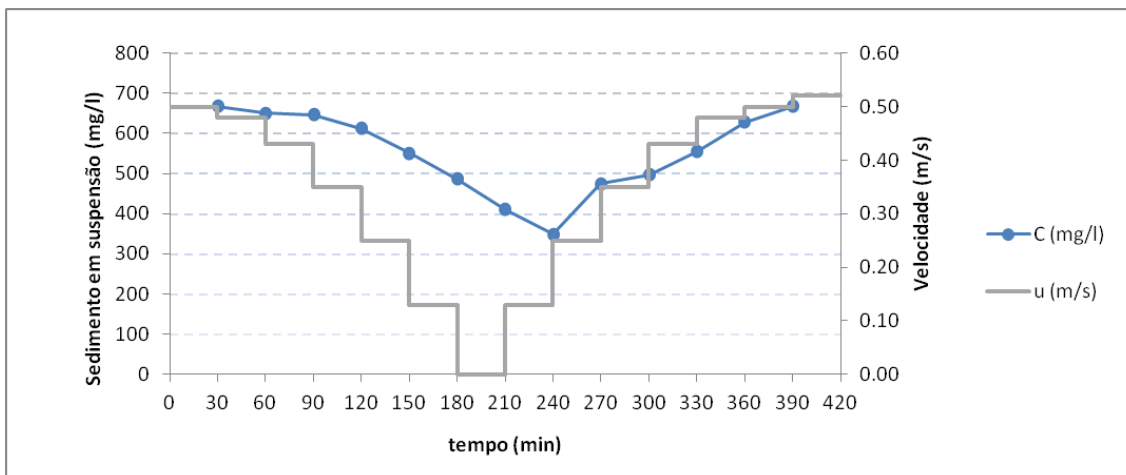


Figura 15 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré 2

O ensaio 3 foi realizado no dia 14 de março de 2014, com início as 9:00. A salinidade medida durante o ensaio foi 5,09‰ e a temperatura 15,7°C.

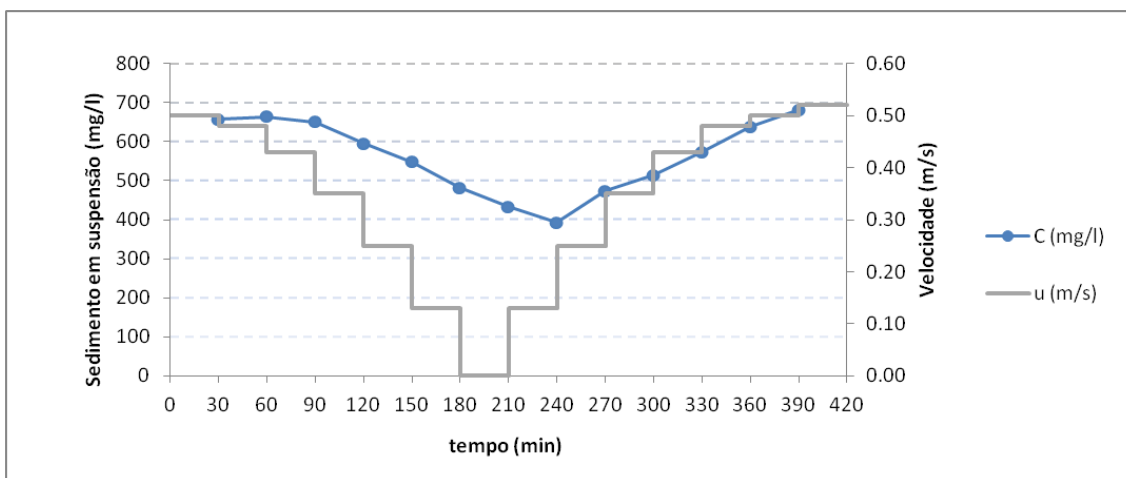


Figura 16 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré 3

O ensaio 4 foi realizado no dia 18 de março de 2014, com início as 9:00. A salinidade medida durante o ensaio foi 10,15‰ e a temperatura 16°C.

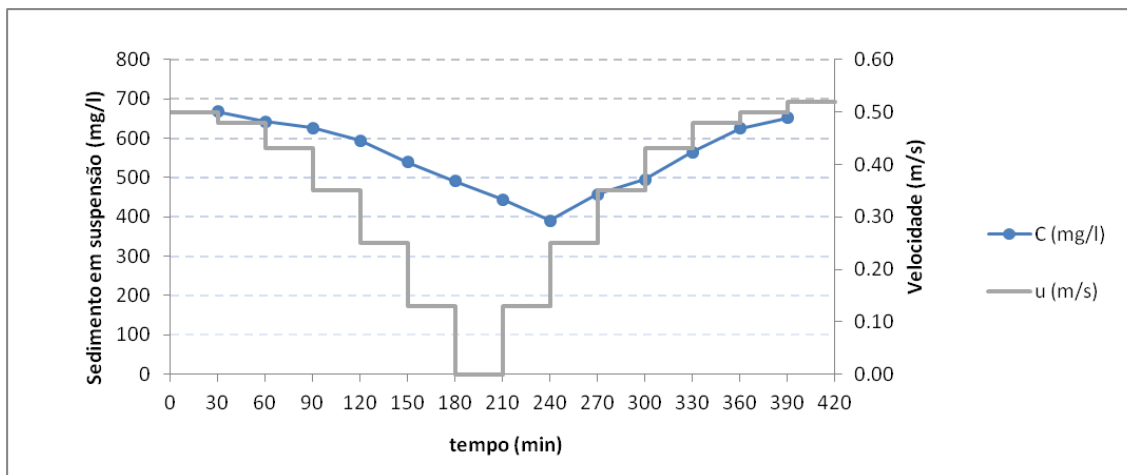


Figura 17 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré 4

O ensaio 5 foi realizado no dia 20 de março de 2014, com início as 9:00. A salinidade medida durante o ensaio foi 15,08‰ e a temperatura 15,9°C.

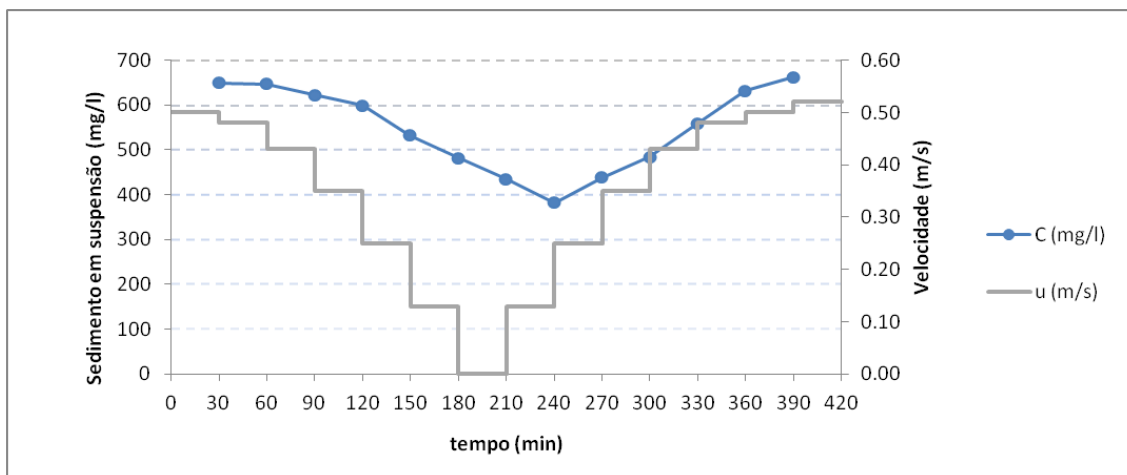


Figura 18 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré 5

Os resultados do primeiro ensaio ( $S=0‰$ ) são um pouco superiores às restantes observações e alguns pontos do segundo ensaio ( $S=2,5‰$ ) também apresentam um afastamento, aparentemente aleatório, das restantes observações. Estas diferenças podem estar relacionadas com imperfeições associadas às condições de ensaio e ao processamento das amostras. No entanto, os resultados são globalmente consistentes.

Os resultados dos cinco ensaios exibem um padrão semelhante, com as concentrações mínimas a ocorrerem no mesmo instante de tempo (ao fim de 4 horas), com desfaseamento temporal

relativamente ao período de velocidades nulas (situado entre as 3 e as 3,5 horas). Este comportamento é fisicamente explicável pelo facto de a deposição dos sedimentos finos se processar lentamente, o que coincide com o que tem sido obtido noutros ensaios, por exemplo, no estudo da ria de Aveiro (Portela e Brito, 2010).

As concentrações máximas e mínimas observadas nos 5 ensaios, embora as mais elevadas correspondam ao ensaio 1 ( $S=0\text{‰}$ ) e as mais baixas correspondam ao ensaio 5 ( $S=15\text{‰}$ ), têm valores situados num intervalo muito estreito.

Quanto ao eventual efeito da salinidade, esse efeito não é observável nos ensaios realizados neste estudo, o que parece contrariar os resultados de outros estudos realizados anteriormente, nomeadamente o estudo das velocidades de sedimentação em repouso (Ramos, 2013). Porém, podem ser equacionadas explicações para tal efeito não se verificar no caso de variações de velocidades diferentes de zero em canal anular. Ao existirem tensões turbulentas que provocam desagregação dos flocos de partículas, nomeadamente junto ao fundo, estas não depositam com a mesma eficácia, sendo este efeito mais forte que o efeito da salinidade (van Rijn, 1993).

A percentagem de sedimento que permanece continuamente em suspensão é acima dos 50% nos 5 ensaios, com valores mais baixos nos ensaios 1 e 2. A baixa velocidade de sedimentação das partículas e o curto período de tempo em que a velocidade de escoamento é baixa e/ou nula são duas razões plausíveis para tal acontecer. Nos ensaios do estudo da ria de Aveiro a percentagem de sedimento que permanece continuamente em suspensão é mais baixa, na ordem dos 40% (Portela e Brito, 2010).

Em anexo segue uma tabela referente aos resultados obtidos nos ensaios de maré (Anexo 1).

Na Figura 19 apresentam-se os resultados dos 5 ensaios em conjunto.

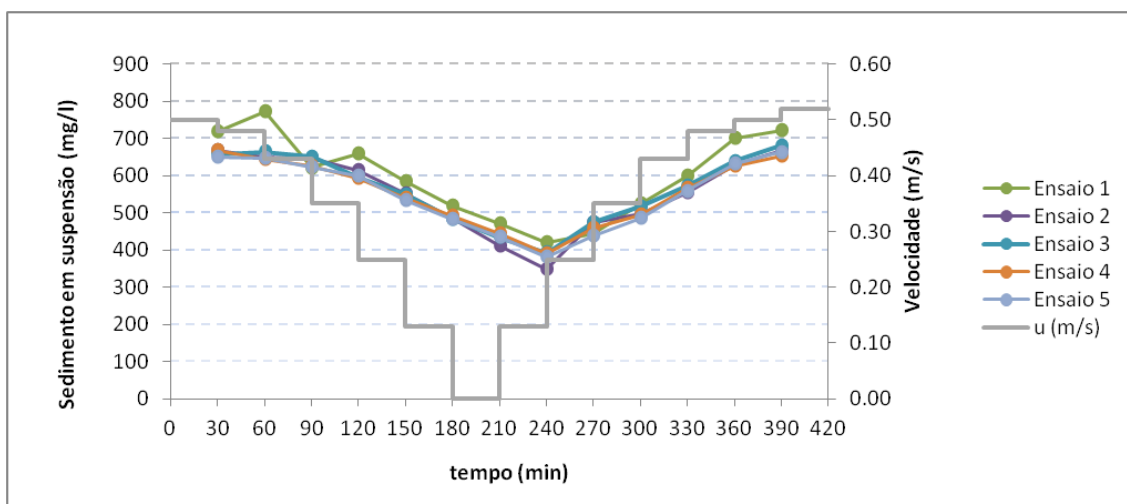


Figura 19 – Concentração em função do tempo para os ensaios de maré 1, 2, 3, 4 e 5

### 5.1.2. Ensaios de deposição

Apresentam-se os resultados obtidos nos cinco ensaios de deposição.

O ensaio 1 foi realizado no dia 11 de março de 2014, com início as 9:00. Com a mesma salinidade que o ensaio de maré 1.

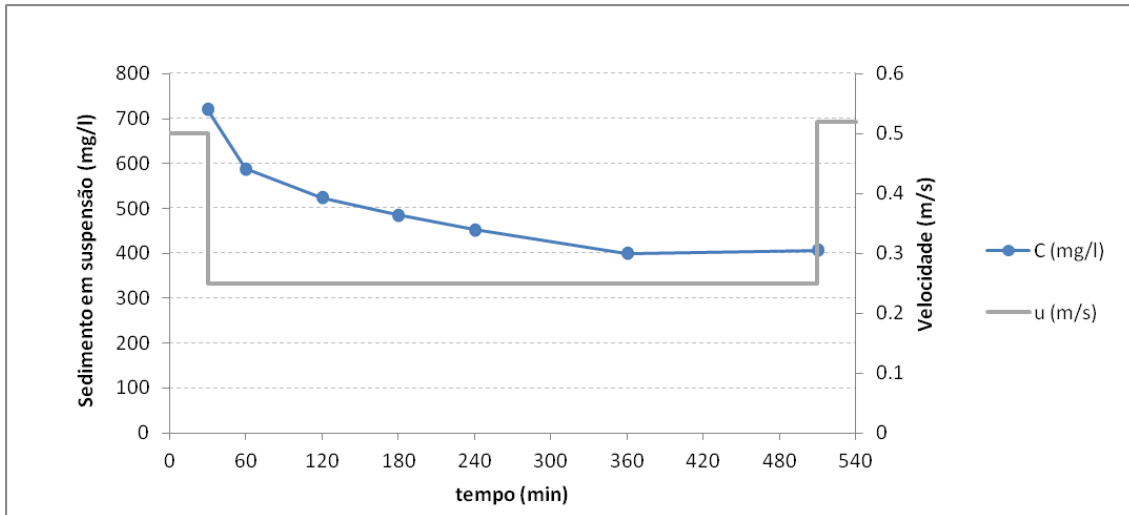


Figura 20 – Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de deposição 1

O ensaio 2 foi realizado no dia 13 de março de 2014, com início as 9:00. Com a mesma salinidade que o ensaio de maré 2.

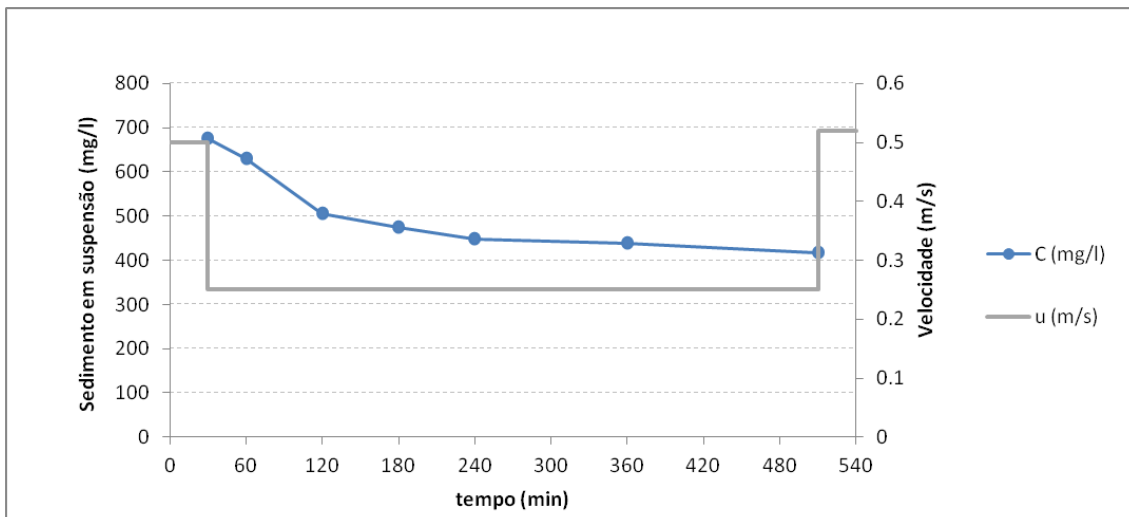


Figura 21 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de deposição 2

O ensaio 3 foi realizado no dia 17 de março de 2014, com início as 9:00. Com a mesma salinidade que o ensaio de maré 3.

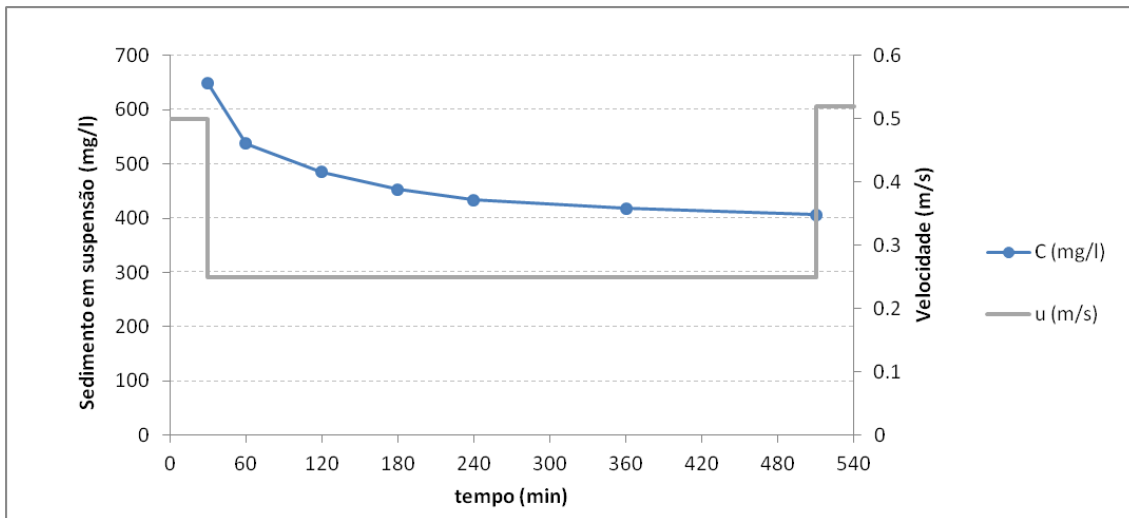


Figura 22 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de deposição 3

O ensaio 4 foi realizado no dia 19 de março de 2014, com início as 9:00. Com a mesma salinidade que o ensaio de maré 4.

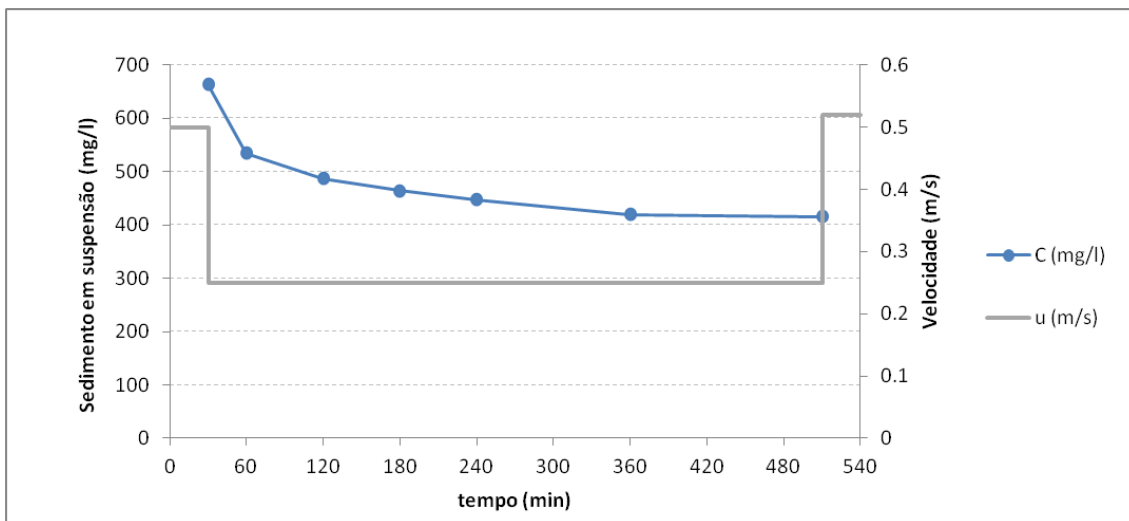


Figura 23 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de deposição 4

O ensaio 5 foi realizado no dia 21 de março de 2014, com início às 9:00. Com a mesma salinidade que o ensaio de maré 5.

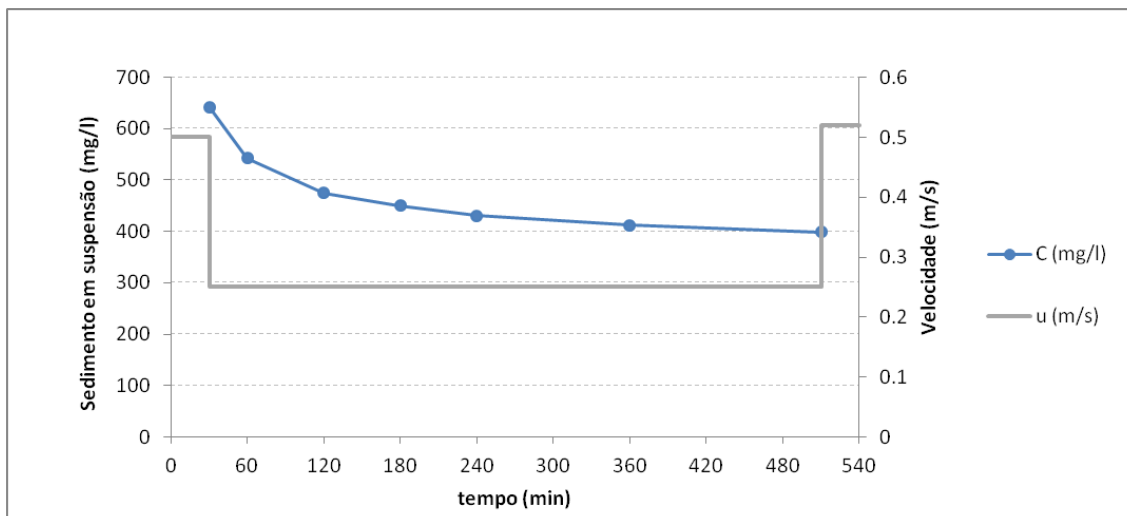


Figura 24 - Concentração e velocidade em função do tempo: Ensaio de deposição 5

Tal como nos ensaios de maré, os resultados do primeiro ensaio são sensivelmente superiores aos restantes e os resultados do segundo ensaio apresentam pontos com dispersão aleatória. A causa é possivelmente a mesma, ou seja, imperfeições na realização do ensaio. No caso dos ensaios de deposição, os resultados dos cinco ensaios também podem ser considerados consistentes.

Os ensaios de deposição apresentam um padrão ainda mais semelhante ao longo dos cinco ensaios, com concentrações ao fim das 8 horas praticamente coincidentes. O intervalo de variação entre os cinco ensaios é inferior a 5% do valor médio.

A percentagem de sedimentos que permanecem em contínua suspensão é cerca de 60%. No estudo da ria de Aveiro (Portela e Brito, 2010), no ensaio de longa duração que foi realizado, foi possível estabelecer uma concentração de equilíbrio ao fim de 24 horas onde apenas 10% do material permanece em suspensão. De notar que, nos ensaios da ria de Aveiro, a suspensão esteve com velocidade nula durante 24 horas, por isso é bastante razoável que a quantidade de sedimento depositado seja muito maior.

Nos ensaios de deposição, como nos ensaios de maré, o efeito da salinidade não é expressivo.

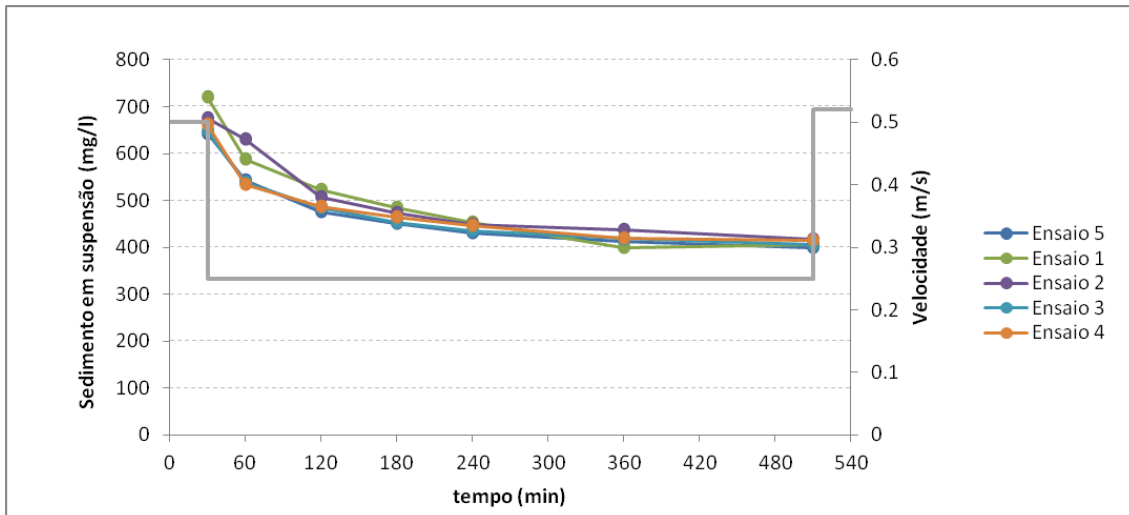


Figura 25 - Concentração e velocidade em função do tempo para os ensaios de deposição 1, 2, 3, 4 e 5

Em anexo segue uma tabela referente aos resultados obtidos nos ensaios de deposição (Tabela A.2).

## 5.2. Granulometria e velocidade em função do tempo

A análise granulométrica pretende avaliar a granulometria dos sedimentos com a variação de velocidade e em função do tempo. Recolheram-se resultados acerca do diâmetro D10, D50 e D90 para cada um dos 5 ensaios, tanto para as condições de maré como para as condições de deposição.

D10 corresponde ao diâmetro para o qual 10% da distribuição das partículas da amostra tem um diâmetro inferior a este valor. D50 corresponde ao diâmetro mediano, ou seja, metade das partículas da amostra têm diâmetro igual ou inferior a este valor. D90 corresponde ao diâmetro para o qual 90% da distribuição das partículas da amostra tem um diâmetro inferior a este valor.

São apresentados os resultados referentes aos cinco ensaios para cada um dos diâmetros analisados. Os restantes resultados são apresentados em anexo (Figuras A.3 – A.33).



### 5.2.1. Ensaio de maré

Os ensaios 1, 2, 3, 4 e 5 foram realizados nos dias 10, 12, 14, 18 e 20 de março de 2014, respectivamente.

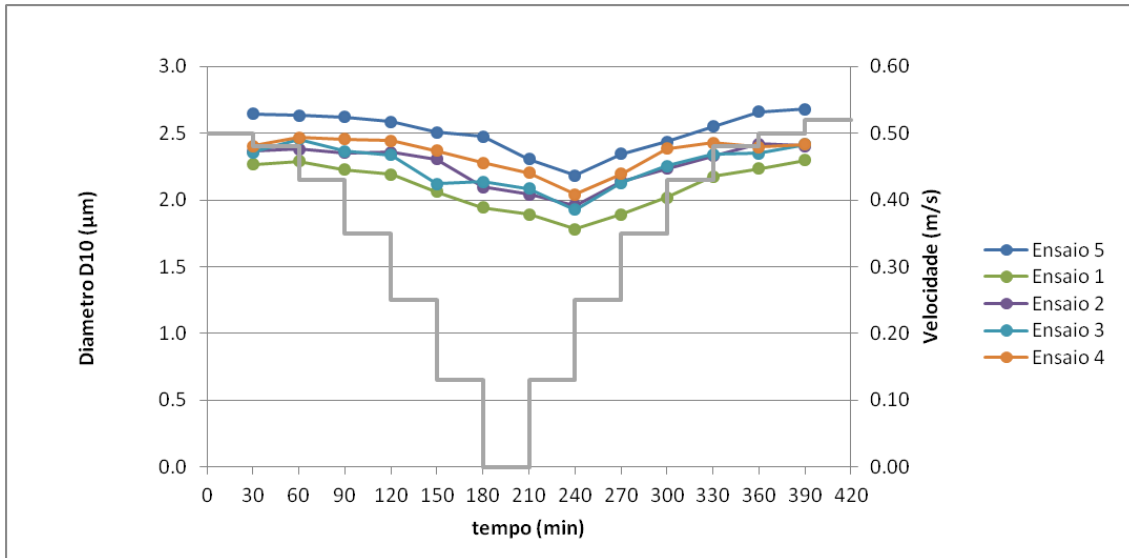


Figura 26 – Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré.

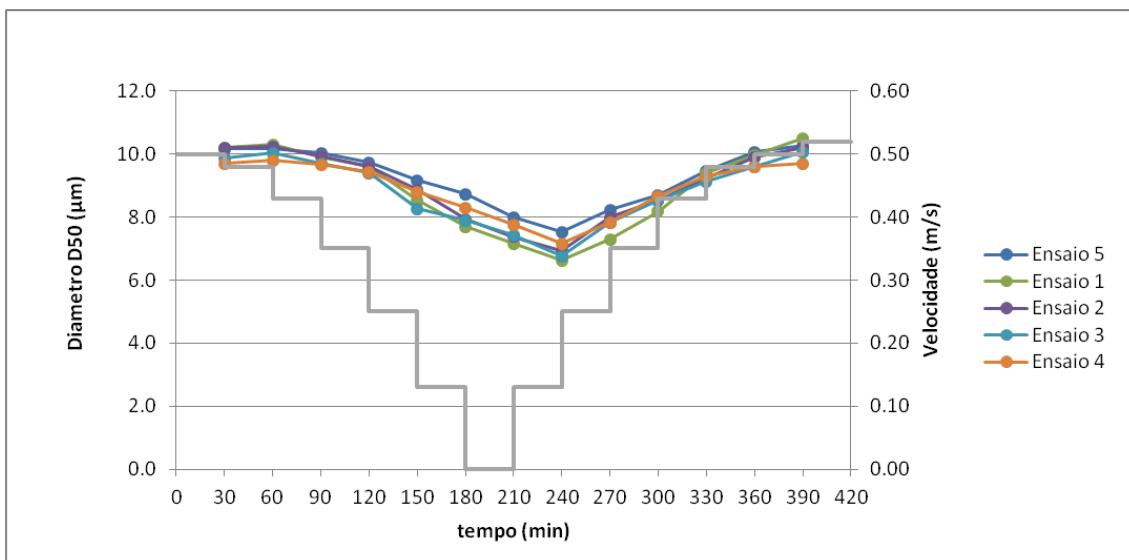


Figura 27 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de maré.

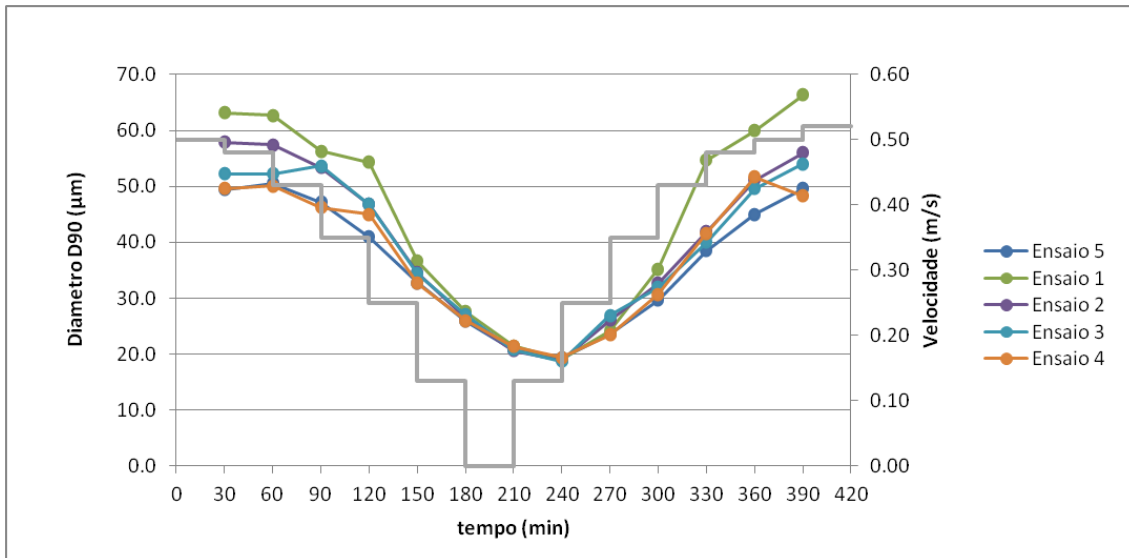


Figura 28 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaios de maré.

Conforme se verifica nas Figuras 26 a 28, os resultados dos 5 ensaios de maré apresentam curvas muito semelhantes entre si. Como se pode observar, os diâmetros D10, D50 e D90 diminuem com velocidades decrescentes e aumentam para velocidades crescentes. Tal como seria de esperar, existe uma maior deposição para velocidades baixas ou nulas, sendo as partículas de maiores dimensões as primeiras a depositarem. O efeito da salinidade não é muito relevante na variação dos diâmetros das partículas em suspensão, dada a semelhança dos resultados obtidos nos 5 ensaios realizados, sendo analisado com mais detalhe nos ensaios de deposição.

## 5.2.2. Ensaios de deposição

Os ensaios de deposição foram realizados nos dias 11, 13, 17, 19 e 21 de março de 2014, respectivamente.

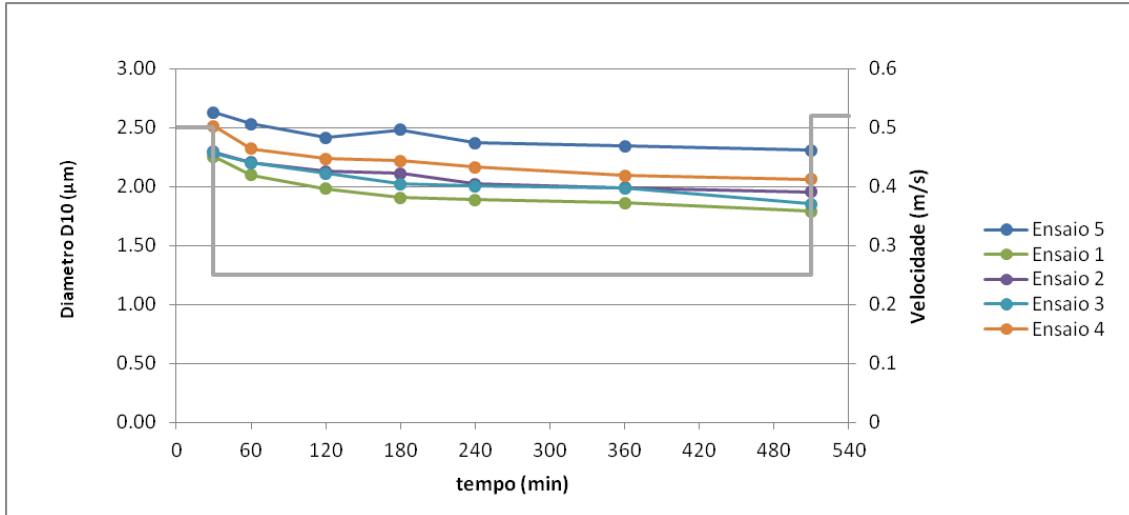


Figura 29 – Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaios de deposição

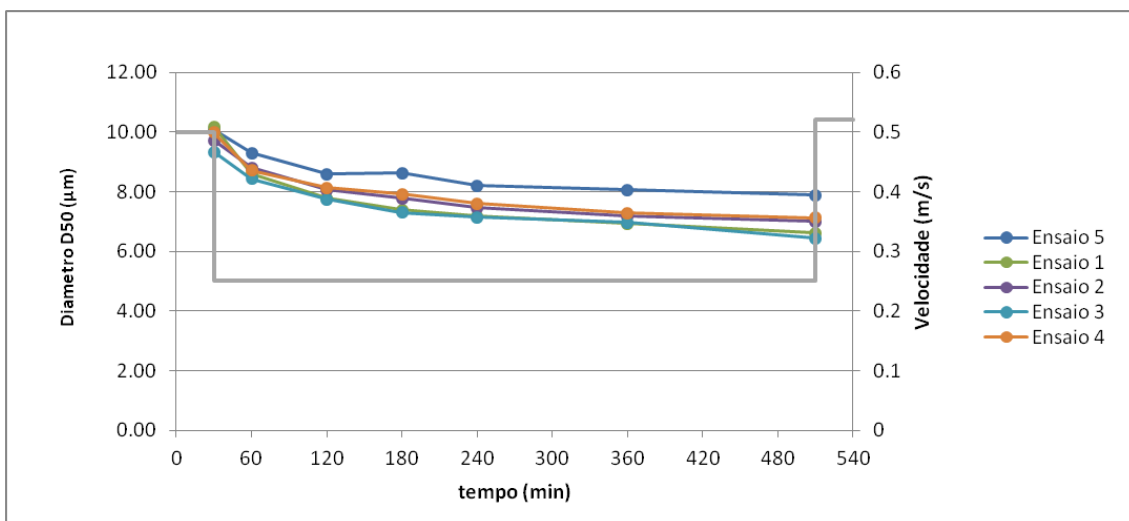
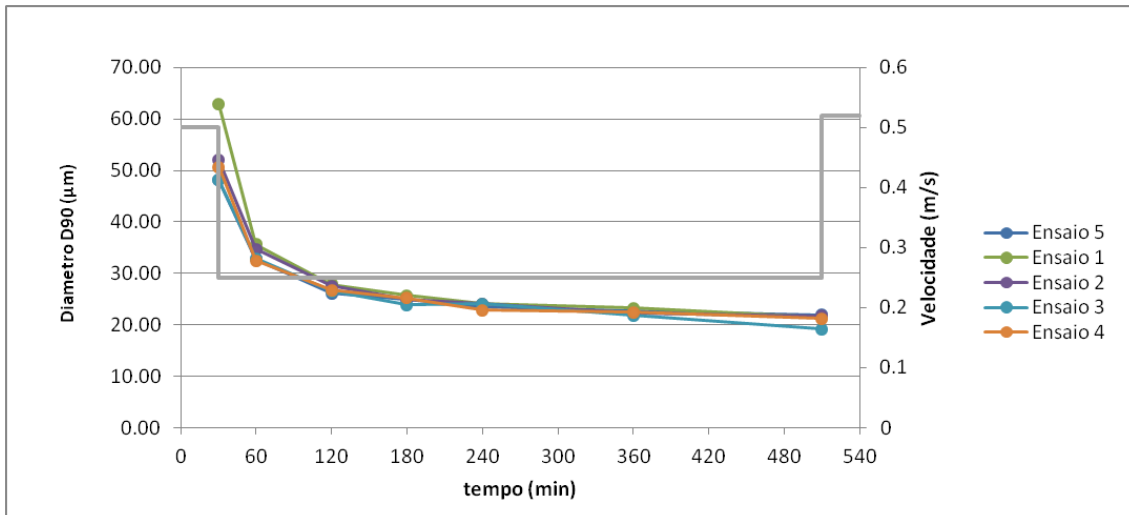


Figura 30 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaios de deposição



**Figura 31 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaios de deposição**

Considerando os resultados observados nas Figuras 29 a 31, verifica-se que no caso de D10, que representa uma medida da parte mais fina da amostra, e que tem valores de granulometria próximos das argilas, os valores aumentam com a salinidade. Este efeito deve-se à influência da salinidade na agregação das partículas mais finas, de natureza argilosa.

No caso de D50, que é o diâmetro mediano, os valores aumentam também com a salinidade, mas de forma menos acentuada. Esta evolução menos acentuada poderá estar relacionada com o facto de, para este valor, contribuírem não apenas argilas mas também siltes, e o comportamento dos siltes ser pouco influenciado pela salinidade.

No caso de D90, que representa uma medida da parte mais grosseira da amostra, não se observa influência da salinidade. No entanto, no ensaio 1, foram obtidos valores mais elevados para as maiores velocidades. Uma possível explicação poderá estar relacionada com a sedimentação de partículas mais grosseiras, que, nos ensaios seguintes, por ficarem presas ao fundo e às paredes do canal, não voltam a entrar em suspensão.

## 6. Conclusões

A capacidade de prever o movimento dos sedimentos finos nos estuários é crucial tanto para a viabilidade funcional dos mesmos como para minimizar impacto económico e ambiental. No entanto, os processos que envolvem sedimentos finos são de complexa determinação e difícil análise, originando resultados que raramente podem ser considerados inteiramente satisfatórios.

No caso de estudo, o Porto de Lisboa, a problemática dos sedimentos finos é uma constante preocupação devido à importância que a atividade portuária nele existente tem no comércio e economia nacional, exigindo que se realizem dragagens com frequência anual.

Os ensaios em canal podem dar um contributo útil no apoio à aplicação de modelos numéricos de previsão do transporte dos sedimentos finos. A realização deste trabalho experimental em canal anular, permitiu averiguar a relação da erosão e deposição de sedimentos finos com a evolução temporal da velocidade, simulando as correntes de marés existentes nos canais naturais em períodos de maré média.

Os resultados foram os esperados e já conhecidos noutros estudos (Portela e Brito, 2010). Verifica-se que a taxa de deposição é tanto maior quanto a velocidade do escoamento for baixa e/ou nula.

Os ensaios realizados tiveram, também, o objetivo de analisar o efeito da salinidade na deposição dos sedimentos. Os resultados referentes a este ponto foram inconclusivos, pois não se verificou que a salinidade tivesse expressão nos resultados obtidos. Facto que pode ser explicado pela superioridade das tensões turbulentas que provocam desagregação dos flocos de partículas retirando eficácia da sua deposição. Contrariamente, em estudo em águas paradas, a salinidade tem efeito considerável e favorável à deposição (Ramos, 2013).

Como recomendação para o prosseguimento deste estudo, considera-se que, em relação aos ensaios de maré, poderiam ser feitos ensaios no canal com variação sinusoidal da velocidade e diferentes valores de velocidade máxima. Nesse caso, estar-se-ia a comparar situações de maré viva e maré morta, onde as correntes de maré têm diferentes intensidades.

Para os ensaios de deposição, de forma a esclarecer melhor o efeito da salinidade sobre a deposição dos sedimentos finos, seria interessante averiguar o que se passaria repetindo os ensaios aplicando uma velocidade inferior a 0,25 m/s (por exemplo, 0,15 ou 0,05 m/s), dado tratar-se de uma situação intermédia entre a que foi ensaiada neste estudo e a situação em repouso, em que poderia ser mais evidente a influência da velocidade de sedimentação sobre a taxa de deposição.



## 7. Referências Bibliográficas

- Berlamont, J., Ockenden, M., Toorman, E., Winterwerp, J. (1993).** The characterisation of cohesive sediments properties. *Coastal Engineering* 21, 105-128,
- Cabral, N. (2010).** *Porto de Lisboa. Navegabilidade do Estuário do Tejo – APL.* (consultado em [http://www.apambiente.pt/\\_zdata/Divulgacao/Projectos/exARH\\_Tejo/Sesoes\\_Debate/Navegabilidade\\_do\\_Tejo/8\\_Natercia\\_Cabral.pdf](http://www.apambiente.pt/_zdata/Divulgacao/Projectos/exARH_Tejo/Sesoes_Debate/Navegabilidade_do_Tejo/8_Natercia_Cabral.pdf), 06/08/2015).
- Costa, R. C. F. G. (1995).** *Three-dimensional modelling of cohesive sediment transport in estuarine environments.* Tese de Doutoramento, University of Liverpool, Liverpool.
- Delo, E. A. (1988).** *Deposition of cohesive sediment from flowing water.* Report SR 152, Hydraulics Research, Wallingford.
- Franz, G., Pinto, L., Ascione, I., Mateus, M., Fernandes, R., Leitão, P., Neves, R. (2014).** Modelling of cohesive sediment dynamics in tidal estuarine systems: Case study of Tagus estuary, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 151, 34-44.
- Freire, P. M. S. (2003).** *Análise granulométrica por difracção laser de sedimentos silto-argilosos. Procedimento de ensaio.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Huang, J., Hilldale, R. C., Greimann, B.P. (2006).** *Cohesive Sediment Transport in Erosion and Sedimentation Manual,* U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Service Center Sedimentation and River Hydraulics Group, Denver, Colorado.
- Pereira, M. T. S., Ramos, R. S. (2014).** The Port of Lisbon, Portugal: Maintenance dredging in a sensitive environmental system. *Terra et Aqua* 134, 5-13.
- Portela, L. I., Reis, M. M. (2004).** Analysis of cohesive sediment transport in decelerating and accelerating flow, Lisbon. In: Smith, J.M. (ed.), *Coastal Engineering 2004 - Proceedings of the 29th International Conference*, Volume 2. Singapore: World Scientific, pp. 1818-1829.
- Portela, L. I., Brito, F. (2010).** *Canal Anular – Deposição e erosão de sedimentos do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Portela, L. I., Ramos, S., Trigo-Teixeira, A. (2013).** Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin. *Journal of Coastal Research* SI 65, 1188-1193.
- Ramos, S. S. S. C. (2013).** *Efeito da salinidade sobre a velocidade de queda de sedimentos finos de uma bacia portuária.* Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- van Rijn, L.C. (1993).** *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.* Aqua Publications, Amsterdam.

**Whitehouse, R., Soulsby, R., Roberts, W., Mitchener, H. (2000).** *Dynamics of Estuarine Muds.*  
Thomas Telford Ltd, London.

Páginas da Internet consultadas:

[www.apl.pt](http://www.apl.pt) (consultado a 09/2015)

[www.construir.pt](http://www.construir.pt) (consultado a 09/2015)



## **ANEXOS**



## Índice de Figuras

Figura A. 1 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 1 .....	51
Figura A. 2 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 2 .....	52
Figura A. 3 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 3 .....	52
Figura A. 4 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 4 .....	53
Figura A. 5 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 5 .....	53
Figura A. 6- Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 1 .....	55
Figura A. 7 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 2 .....	55
Figura A. 8 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 3 .....	56
Figura A. 9 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 4 .....	56
Figura A. 10 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 5 .....	57
Figura A. 11- Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 1 .....	58
Figura A. 12 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 2 .....	58
Figura A. 13 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 3 .....	59
Figura A. 14 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 4 .....	59
Figura A. 15 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 5 .....	60
Figura A. 16 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 1 .....	61
Figura A. 17 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 2 .....	61
Figura A. 18 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 3 .....	62
Figura A. 19 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 4 .....	62
Figura A. 20 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 5 .....	63
Figura A. 21 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 1 .....	64
Figura A. 22 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 2 .....	64
Figura A. 23 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 3 .....	65
Figura A. 24 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 4 .....	65
Figura A. 25 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 5 .....	66
Figura A. 26 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 1 .....	67
Figura A. 27 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 2 .....	67
Figura A. 28 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 3 .....	68
Figura A. 29 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 4 .....	68
Figura A. 30 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 5 .....	69



## Índice de Tabelas

Tabela A. 1 - Resultados dos ensaios de maré: Concentração e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades. ....	49
Tabela A. 2 - Resultados dos ensaios de deposição: Concentração e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades.....	50
Tabela A. 3 - Resultados dos ensaios de maré: Diâmetro D10 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades .....	51
Tabela A. 4 - Resultados dos ensaios de maré: Diâmetro D50 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades .....	54
Tabela A. 5 - Resultados dos ensaios de maré: Diâmetro D90 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades .....	57
Tabela A. 6 - Resultados dos ensaios de Deposição: Diâmetro D10 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades.....	60
Tabela A. 7 - Resultados dos ensaios de Deposição: Diâmetro D50 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades.....	63
Tabela A. 8 - Resultados dos ensaios de Deposição: Diâmetro D90 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades.....	66



**Tabela A. 1 - Resultados dos ensaios de maré: Concentração e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades.**

Hora	Tempo (min)	u (m/s)	Tensão (Pa)	Amostras	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
					S = 0		S = 2.5		S = 5		S = 10		S = 15	
					Volume (l)	C (g/l)	Volume (l)	C (g/l)	Volume (l)	C (g/l)	Volume (l)	C (g/l)	Volume (l)	C (g/l)
9:00	0	0.50	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9:30	30	0.48	0.38	1	0.166	0.719	0.162	0.668	0.157	0.657	0.153	0.667	0.150	0.650
10:00	60	0.43	0.30	2	0.156	0.771	0.157	0.650	0.152	0.664	0.151	0.643	0.151	0.647
10:30	90	0.35	0.20	3	0.149	0.621	0.157	0.647	0.155	0.650	0.149	0.626	0.148	0.623
11:00	120	0.25	0.10	4	0.160	0.658	0.160	0.613	0.159	0.595	0.150	0.594	0.150	0.599
11:30	150	0.13	0.03	5	0.148	0.585	0.152	0.550	0.153	0.548	0.148	0.539	0.147	0.533
12:00	180	0.00	0.00	6	0.158	0.517	0.153	0.486	0.152	0.482	0.157	0.491	0.144	0.482
12:30	210	0.13	0.03	7	0.154	0.470	0.149	0.410	0.155	0.434	0.145	0.444	0.141	0.435
13:00	240	0.25	0.10	8	0.151	0.419	0.153	0.349	0.144	0.392	0.149	0.390	0.145	0.382
13:30	270	0.35	0.20	9	0.160	0.444	0.154	0.474	0.151	0.474	0.140	0.458	0.148	0.439
14:00	300	0.43	0.30	10	0.156	0.525	0.149	0.497	0.150	0.515	0.143	0.496	0.147	0.485
14:30	330	0.48	0.38	11	0.148	0.599	0.157	0.554	0.147	0.573	0.150	0.565	0.139	0.559
15:00	360	0.50	0.40	12	0.151	0.701	0.157	0.628	0.157	0.639	0.142	0.625	0.149	0.632
15:30	390	0.52	0.44	13	0.156	0.721	0.150	0.668	0.155	0.681	0.137	0.652	0.153	0.663

**Tabela A. 2 - Resultados dos ensaios de deposição: Concentração e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades.**

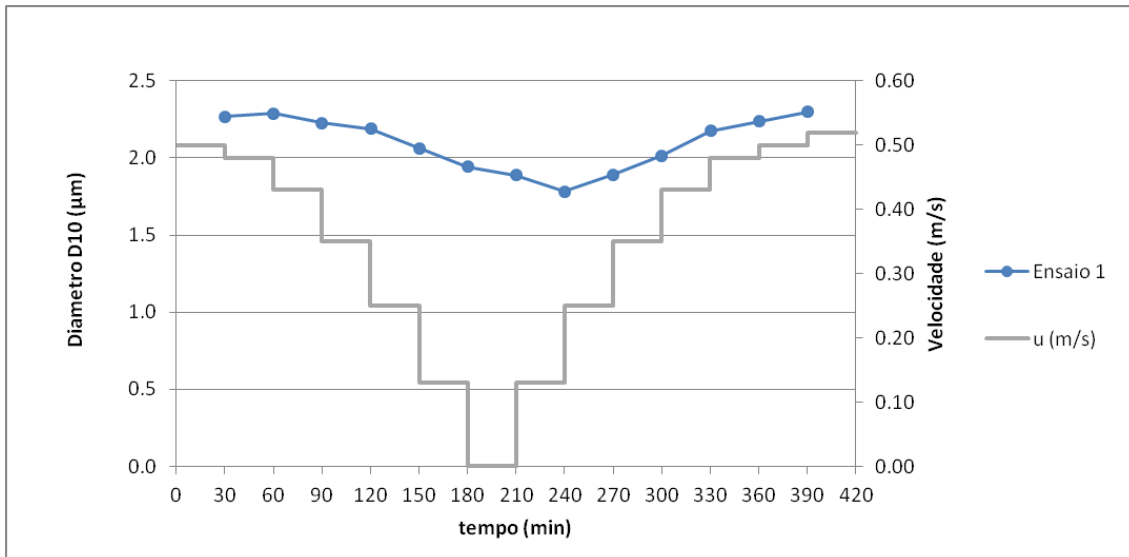
Hora	Tempo (min)	u (m/s)	Tensão (Pa)	Amostras	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
					S = 0		S = 2.5		S = 5		S = 10		S = 15	
					Volume (l)	C (g/l)	Volume (l)	C (g/l)	Volume (l)	C (g/l)	Volume (l)	C (g/l)	Volume (l)	C (g/l)
9:00	0	0.50	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9:30	30	0.25	0.10	14	0.157	0.720	0.155	0.676	0.141	0.648	0.151	0.662	0.147	0.643
10:00	60		0.10	15	0.157	0.588	0.144	0.630	0.147	0.538	0.150	0.533	0.152	0.542
11:00	120		0.10	16	0.161	0.523	0.150	0.506	0.152	0.485	0.146	0.487	0.148	0.475
12:00	180		0.10	17	0.148	0.485	0.151	0.474	0.156	0.453	0.149	0.464	0.154	0.450
13:00	240		0.10	18	0.160	0.452	0.158	0.448	0.149	0.434	0.154	0.446	0.157	0.431
15:00	360		0.10	19	0.159	0.399	0.163	0.438	0.158	0.418	0.141	0.419	0.144	0.412
17:30	510	0.52	0.44	20	0.158	0.406	0.148	0.417	0.157	0.407	0.139	0.416	0.146	0.399



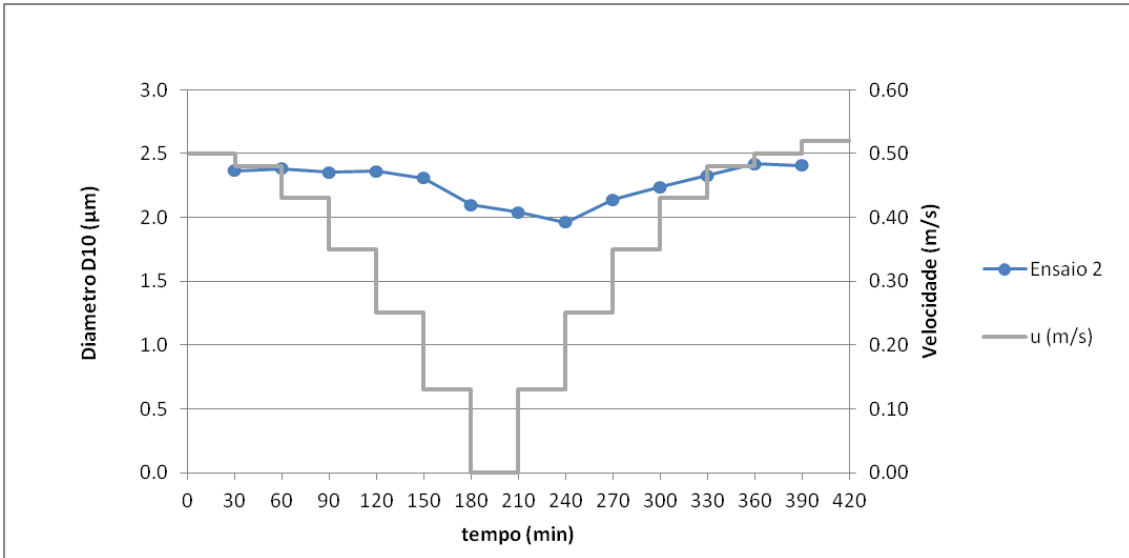
**Tabela A. 3 - Resultados dos ensaios de maré: Diâmetro D10 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades**

Hora	Tempo (min)	u (m/s)	Amostras	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
				S=0	S=2.5	S=5	S=10	S=15
9:00	0	0.50	-	-	-	-	-	-
9:30	30	0.48	1	2.267	2.367	2.357	2.407	2.647
10:00	60	0.43	2	2.290	2.380	2.457	2.470	2.633
10:30	90	0.35	3	2.227	2.353	2.363	2.457	2.623
11:00	120	0.25	4	2.190	2.360	2.337	2.447	2.587
11:30	150	0.13	5	2.063	2.307	2.123	2.370	2.510
12:00	180	0.00	6	1.943	2.097	2.137	2.280	2.477
12:30	210	0.13	7	1.890	2.040	2.087	2.203	2.307
13:00	240	0.25	8	1.783	1.960	1.927	2.040	2.187
13:30	270	0.35	9	1.893	2.140	2.130	2.197	2.347
14:00	300	0.43	10	2.017	2.237	2.253	2.387	2.437
14:30	330	0.48	11	2.177	2.330	2.340	2.430	2.550
15:00	360	0.50	12	2.237	2.420	2.350	2.397	2.660
15:30	390	0.52	13	2.300	2.407	2.417	2.417	2.683

**Figura A. 1 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 1.**



**Figura A. 2 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 2**



**Figura A. 3 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 3**

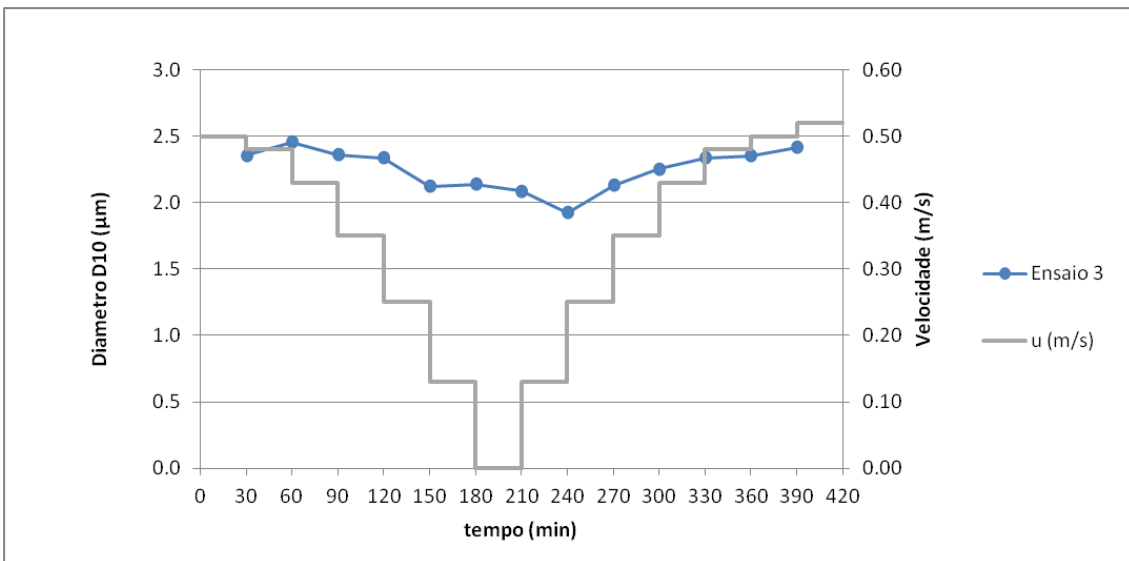


Figura A. 4 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 4

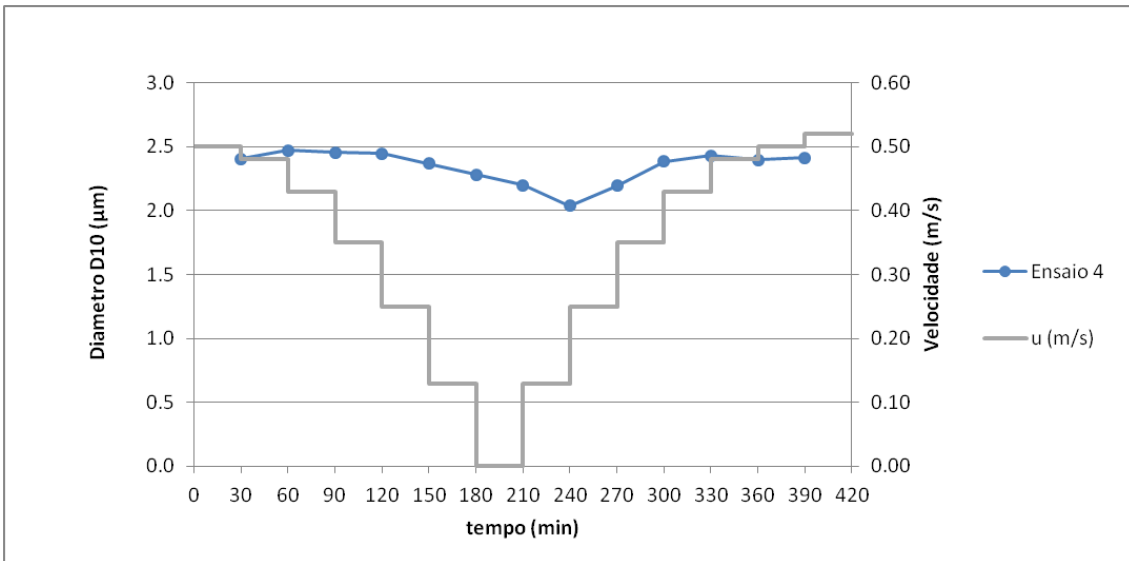
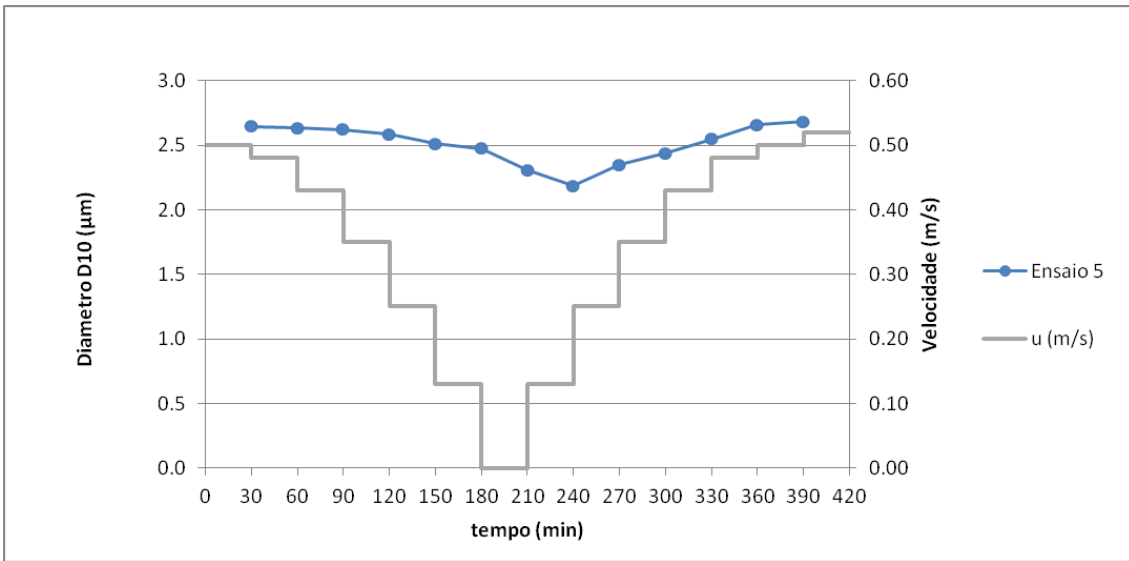


Figura A. 5 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 5



**Tabela A. 4 - Resultados dos ensaios de maré: Diâmetro D50 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades**

Hora	Tempo (min)	u (m/s)	Amostras	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
				S=0	S=2.5	S=5	S=10	S=15
9:00	0	0.50	-	-	-	-	-	-
9:30	30	0.48	1	10.193	10.197	9.880	9.700	10.167
10:00	60	0.43	2	10.303	10.243	10.047	9.810	10.163
10:30	90	0.35	3	9.920	9.950	9.710	9.680	10.043
11:00	120	0.25	4	9.590	9.603	9.407	9.440	9.727
11:30	150	0.13	5	8.540	8.853	8.257	8.817	9.160
12:00	180	0.00	6	7.693	7.930	7.890	8.293	8.730
12:30	210	0.13	7	7.180	7.383	7.420	7.780	8.010
13:00	240	0.25	8	6.620	6.947	6.757	7.177	7.520
13:30	270	0.35	9	7.297	7.990	7.847	7.837	8.233
14:00	300	0.43	10	8.183	8.527	8.547	8.660	8.717
14:30	330	0.48	11	9.410	9.220	9.130	9.300	9.470
15:00	360	0.50	12	9.970	9.910	9.607	9.610	10.083
15:30	390	0.52	13	10.497	10.210	10.077	9.700	10.263

Figura A. 6- Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 1

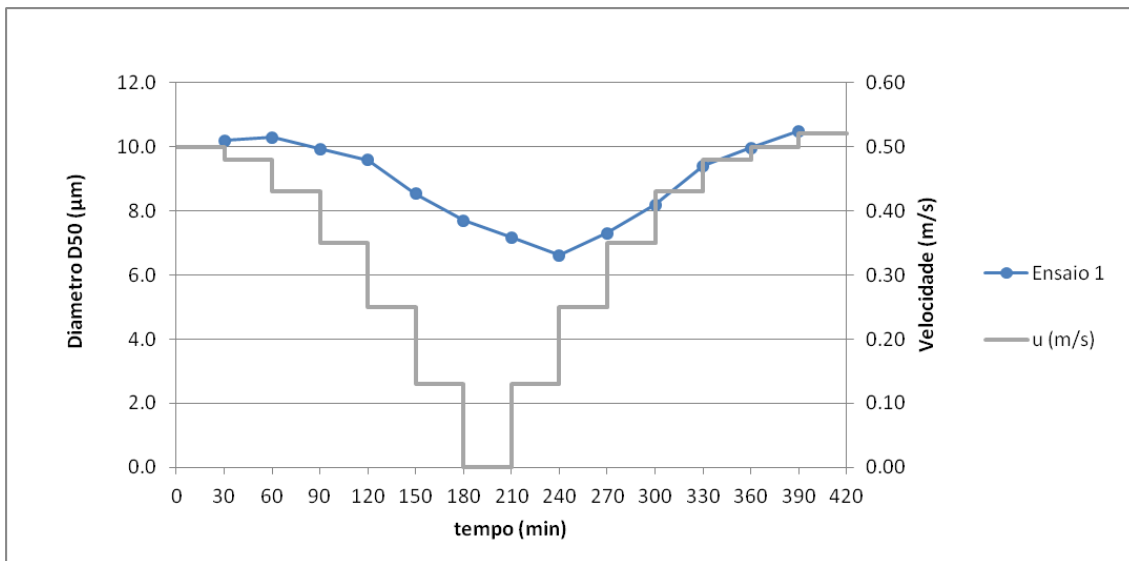
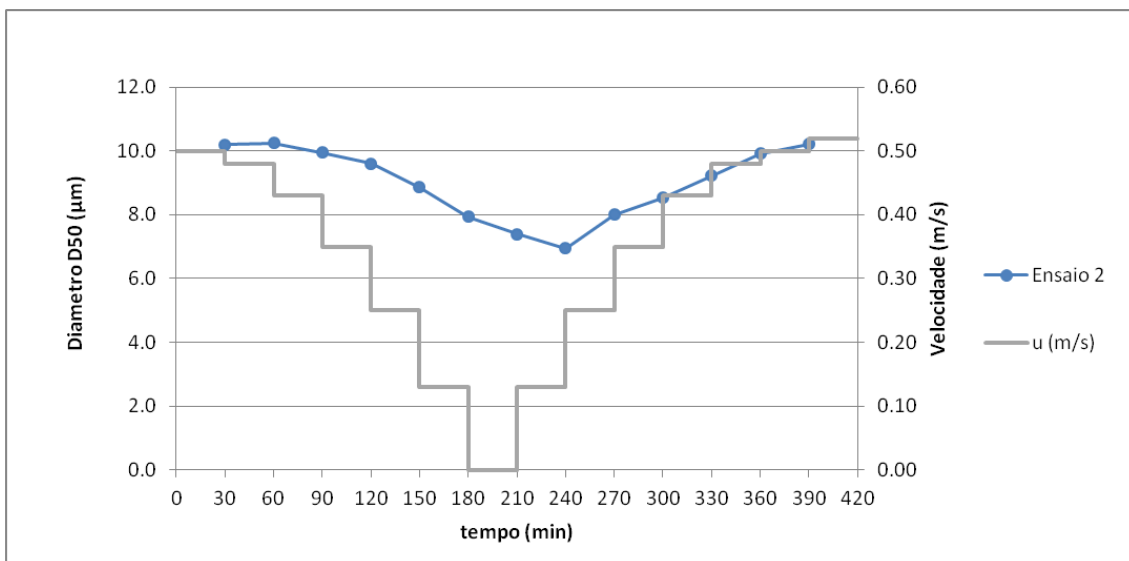
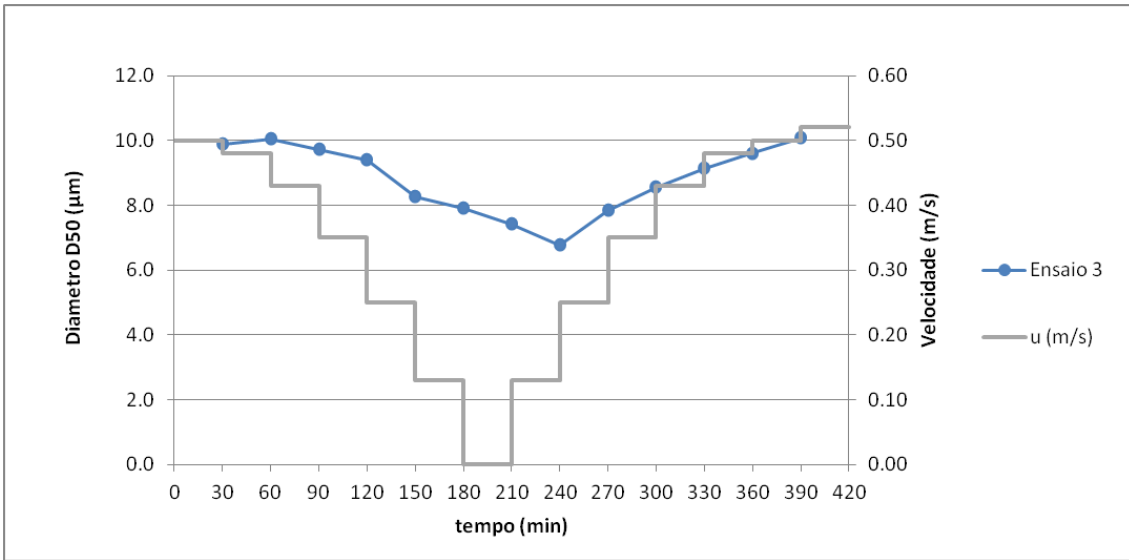


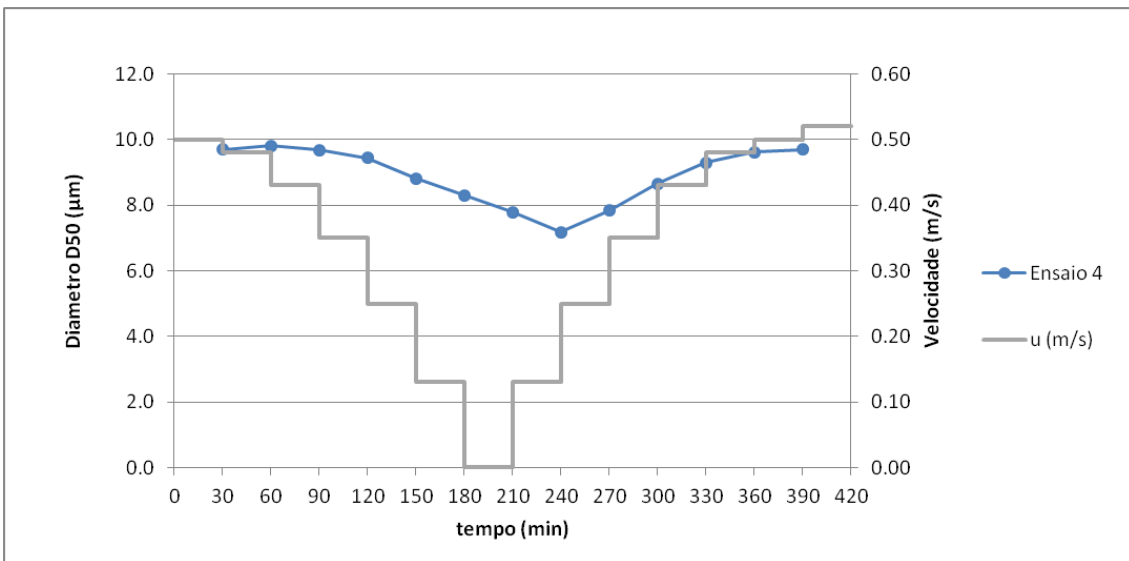
Figura A. 7 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 2



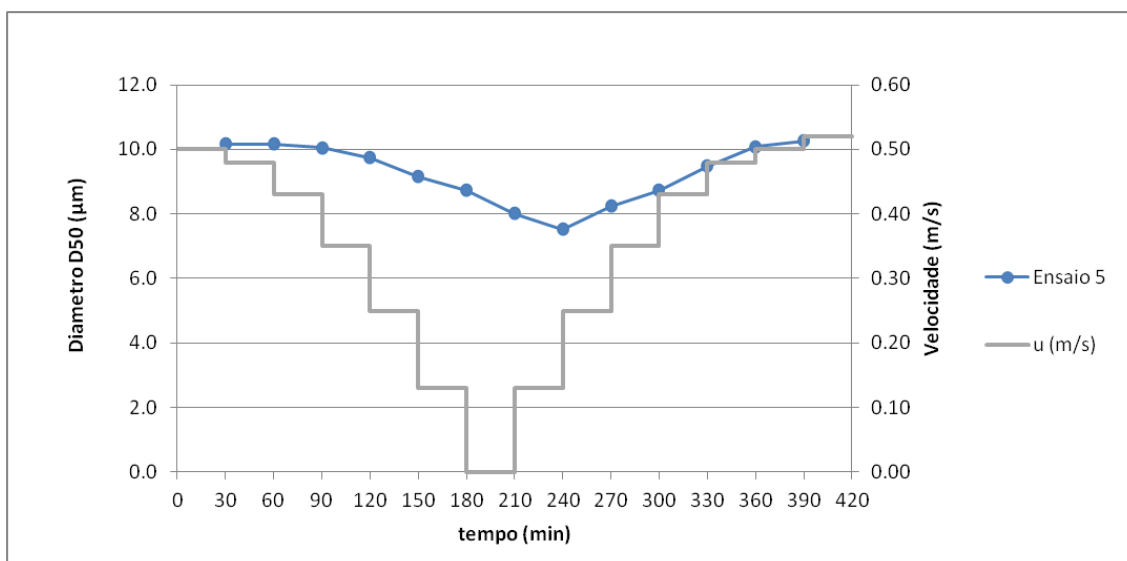
**Figura A. 8 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 3**



**Figura A. 9 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 4**



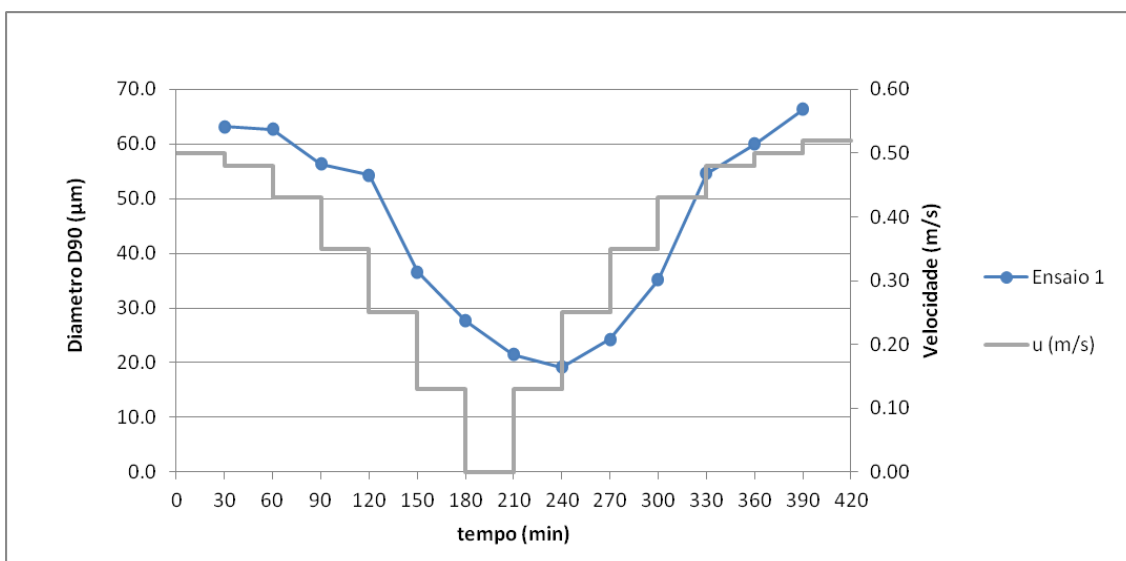
**Figura A. 10 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 5**



**Tabela A. 5 - Resultados dos ensaios de maré: Diâmetro D90 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades**

Hora	Tempo (min)	u (m/s)	Amostras	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
				S=0	S=2.5	S=5	S=10	S=15
9:00	0	0.50	-	-	-	-	-	-
9:30	30	0.48	1	63.120	57.860	52.150	49.640	49.390
10:00	60	0.43	2	62.683	57.393	52.240	50.067	50.563
10:30	90	0.35	3	56.277	53.287	53.643	46.243	47.177
11:00	120	0.25	4	54.270	46.823	46.743	44.987	40.960
11:30	150	0.13	5	36.560	34.530	34.393	32.627	32.730
12:00	180	0.00	6	27.553	26.403	27.010	25.973	25.877
12:30	210	0.13	7	21.450	20.660	20.790	21.347	20.853
13:00	240	0.25	8	19.107	18.863	18.743	19.383	19.330
13:30	270	0.35	9	24.240	26.133	26.920	23.493	23.653
14:00	300	0.43	10	35.190	32.673	31.897	30.673	29.680
14:30	330	0.48	11	54.623	41.900	39.960	41.573	38.507
15:00	360	0.50	12	59.917	51.067	49.653	51.700	44.980
15:30	390	0.52	13	66.287	55.953	53.997	48.240	49.617

**Figura A. 11- Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 1**



**Figura A. 12 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 2**

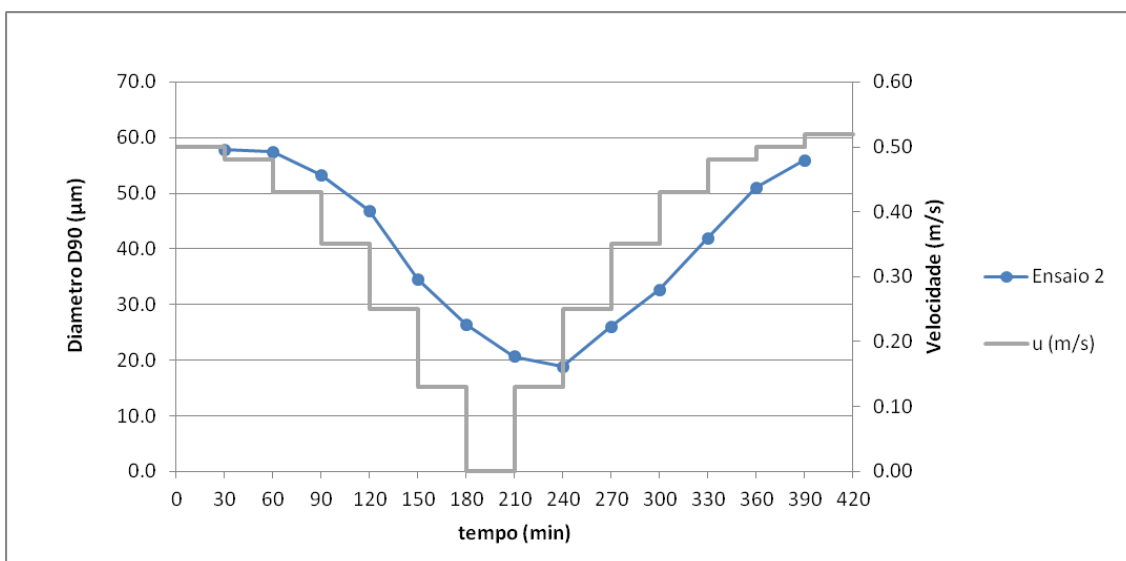




Figura A. 13 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 3

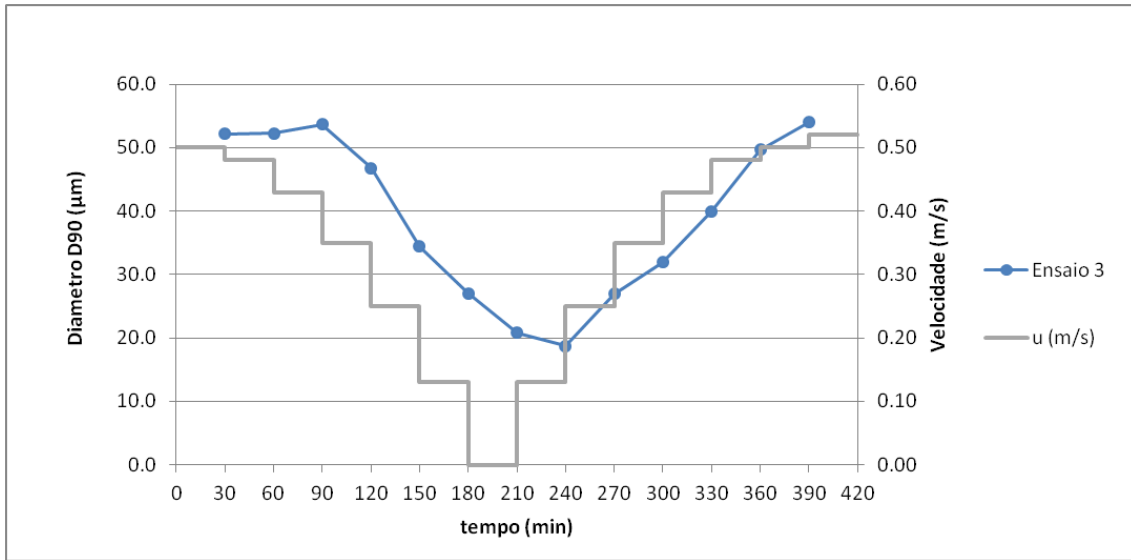
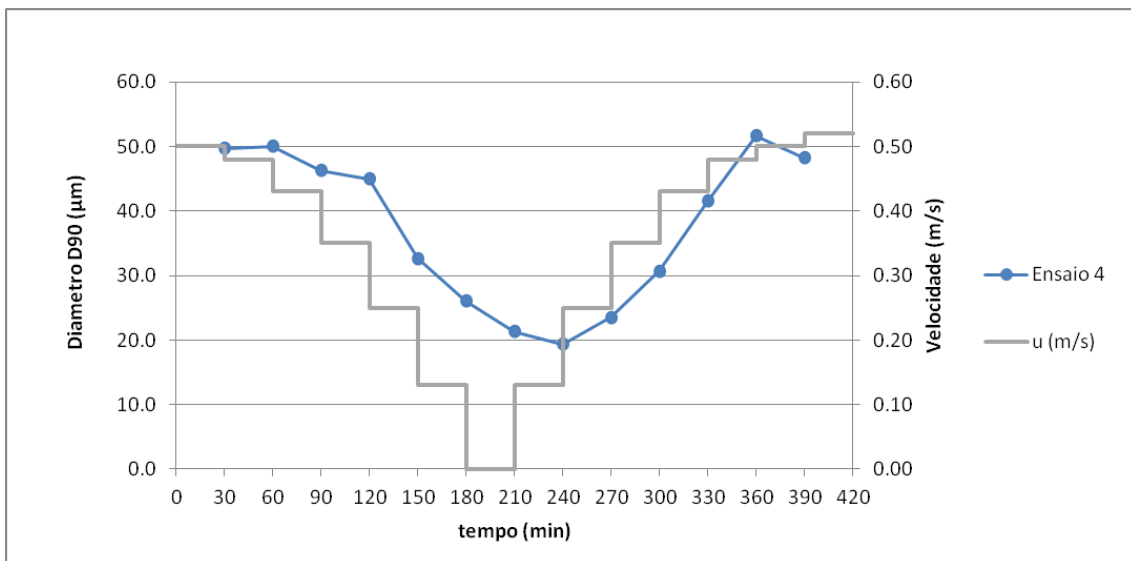
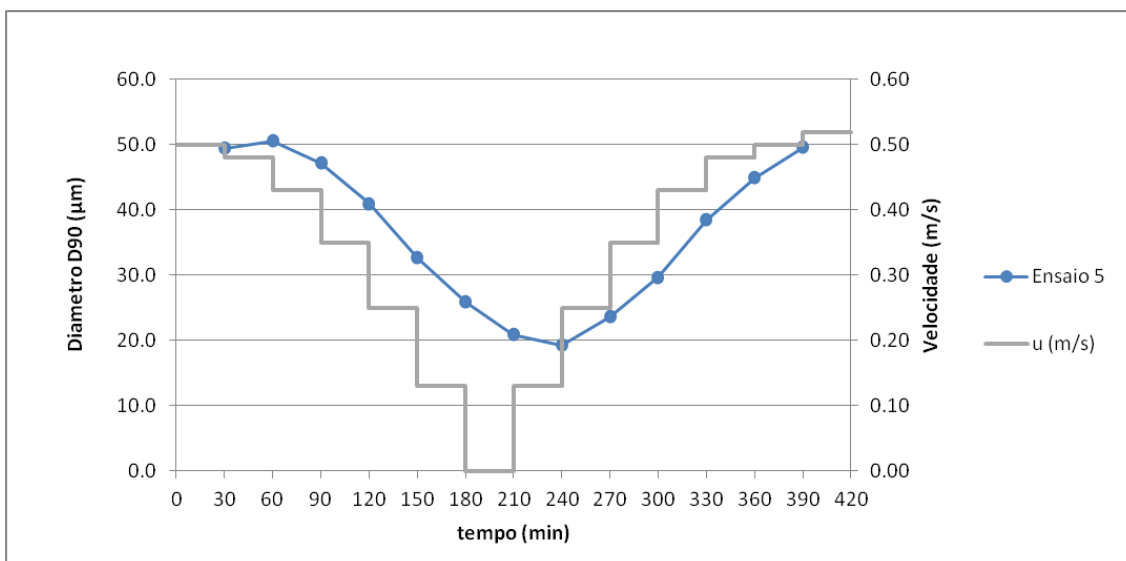


Figura A. 14 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 4



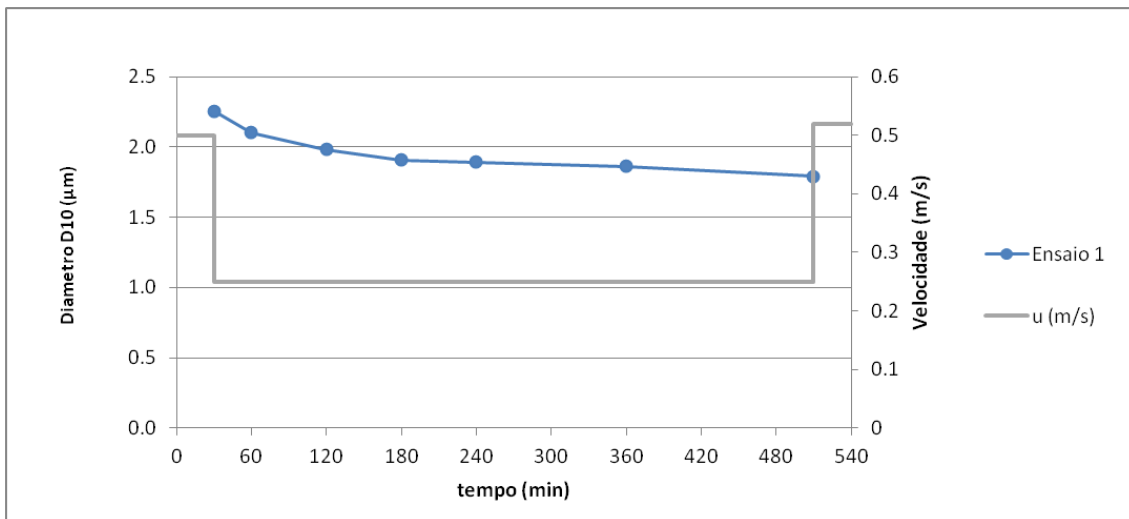
**Figura A. 15 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Maré 5**



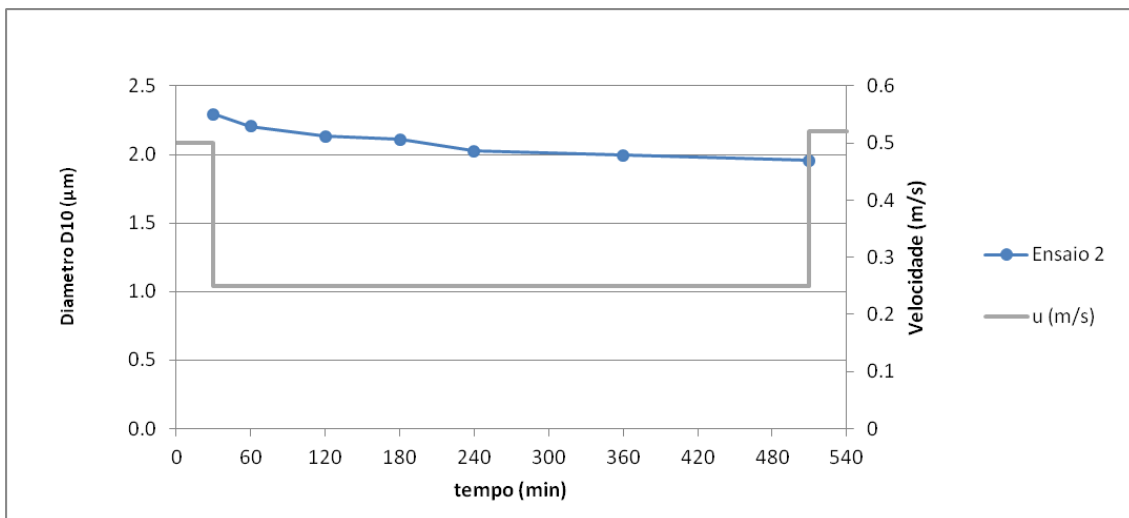
**Tabela A. 6 - Resultados dos ensaios de deposição: Diâmetro D10 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades**

Hora	Tempo (min)	u (m/s)	Amostras	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
				S=0	S=2.5	S=5	S=10	S=15
9:00	0	0.50	-	-	-	-	-	-
9:30	30	0.25	14	2.253	2.297	2.287	2.517	2.630
10:00	60	0.25	15	2.100	2.207	2.203	2.323	2.537
11:00	120	0.25	16	1.983	2.133	2.110	2.237	2.413
12:00	180	0.25	17	1.907	2.110	2.027	2.220	2.483
13:00	240	0.25	18	1.890	2.027	2.007	2.163	2.370
15:00	360	0.25	19	1.860	1.993	1.987	2.097	2.343
17:30	510	0.52	20	1.790	1.957	1.857	2.063	2.310

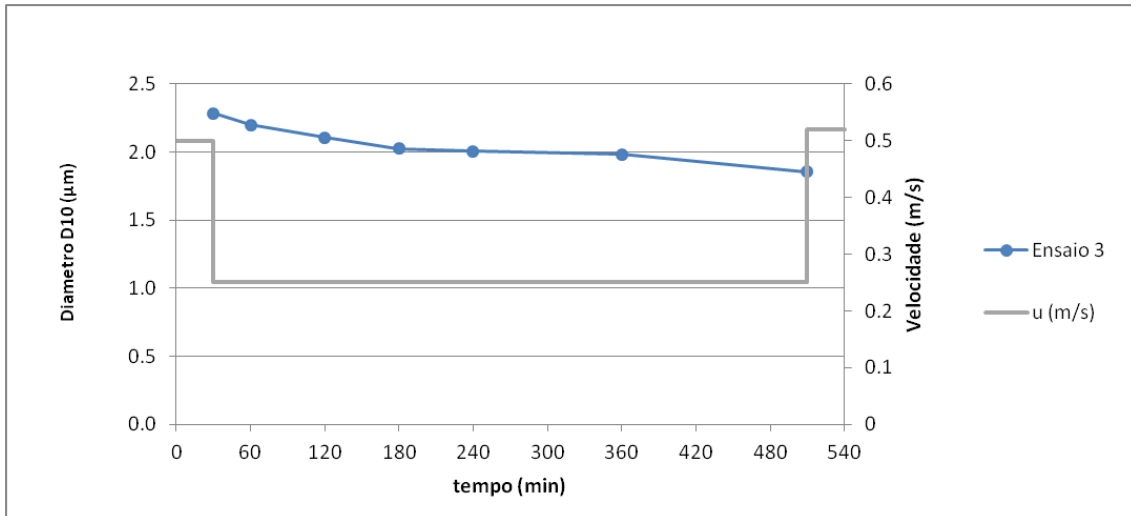
**Figura A. 16 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 1**



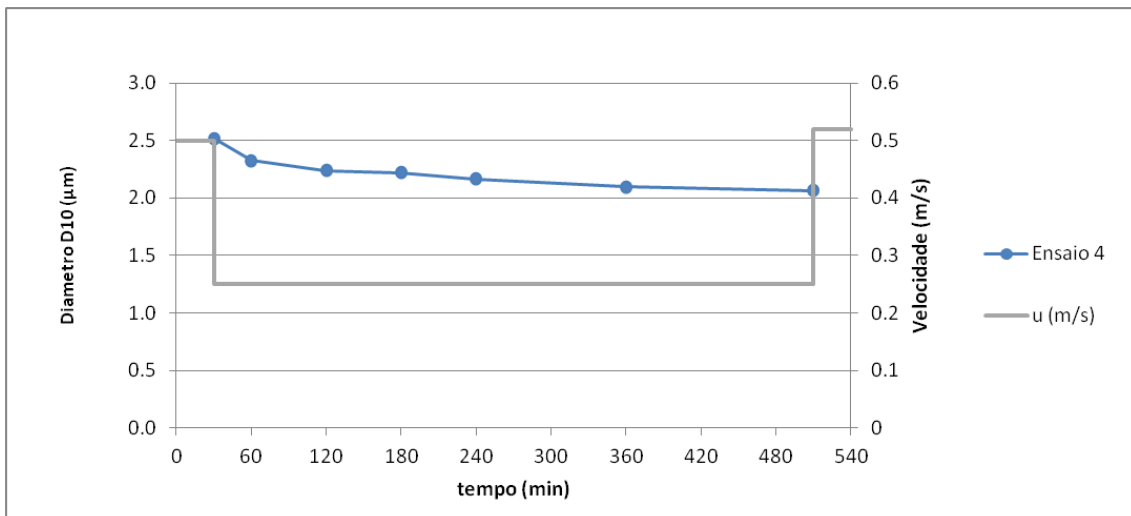
**Figura A. 17 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 2**



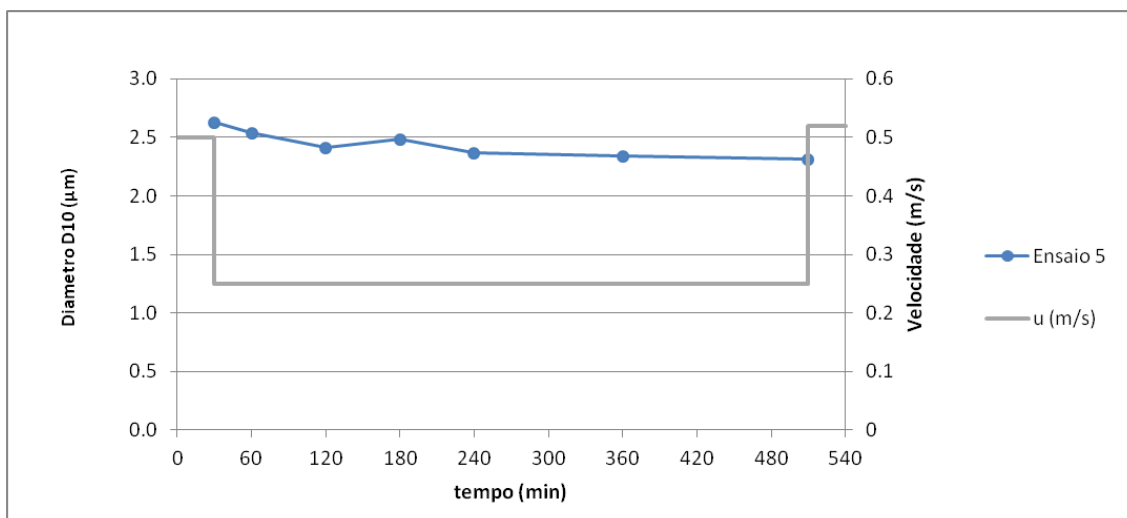
**Figura A. 18 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 3**



**Figura A. 19 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 4**



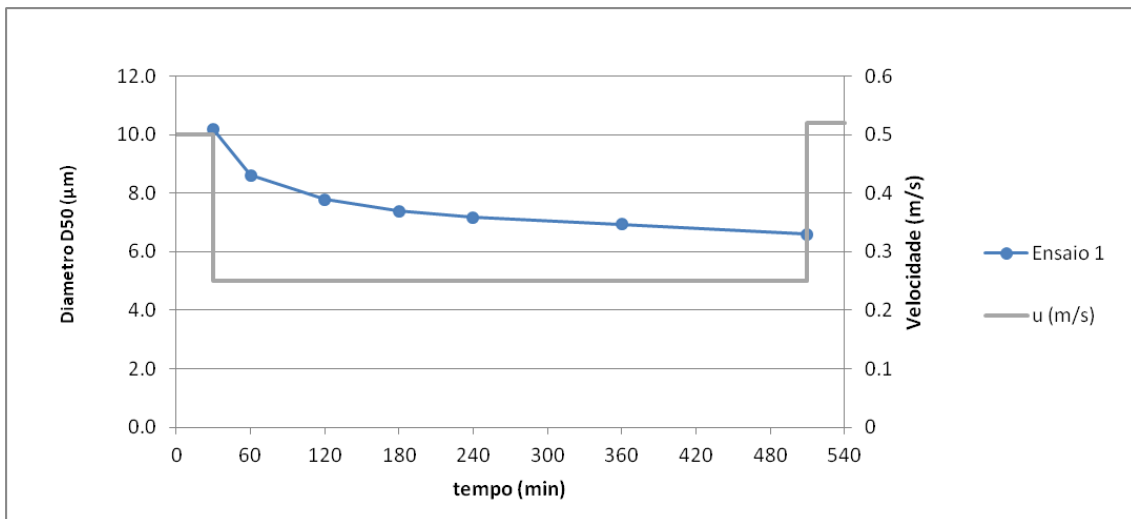
**Figura A. 20 - Diâmetro D10 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 5**



**Tabela A. 7 - Resultados dos ensaios de deposição: Diâmetro D50 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades**

Hora	Tempo (min)	u (m/s)	Amostras	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
				S=0	S=2.5	S=5	S=10	S=15
9:00	0	0.50	-	-	-	-	-	-
9:30	30	0.25	14	10.180	9.740	9.347	9.990	10.077
10:00	60	0.25	15	8.613	8.810	8.437	8.717	9.290
11:00	120	0.25	16	7.783	8.067	7.740	8.130	8.600
12:00	180	0.25	17	7.383	7.780	7.307	7.940	8.627
13:00	240	0.25	18	7.187	7.470	7.163	7.613	8.203
15:00	360	0.25	19	6.943	7.183	6.970	7.303	8.073
17:30	510	0.52	20	6.610	7.017	6.450	7.130	7.887

**Figura A. 21 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 1**



**Figura A. 22 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 2**

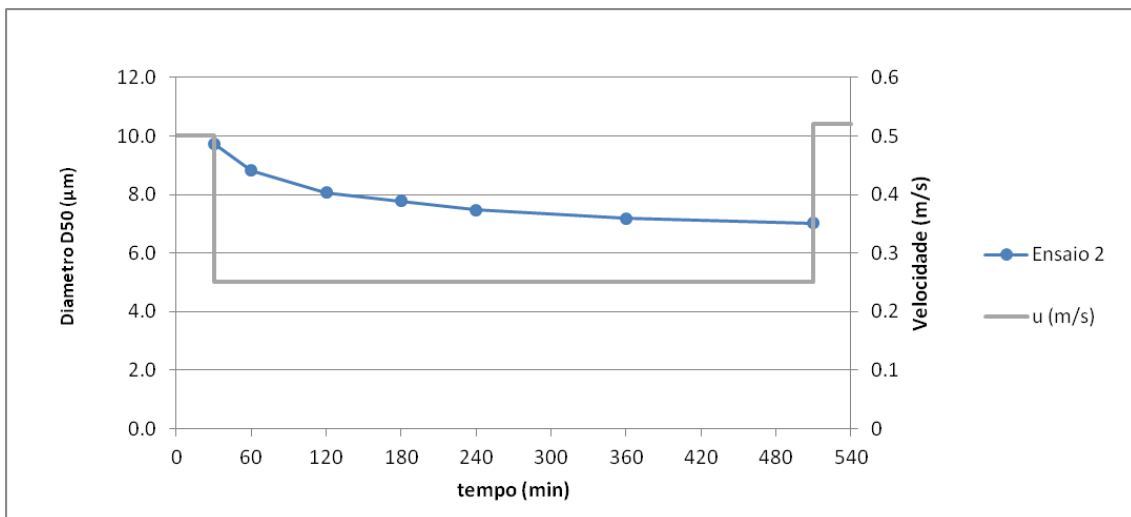


Figura A. 23 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 3

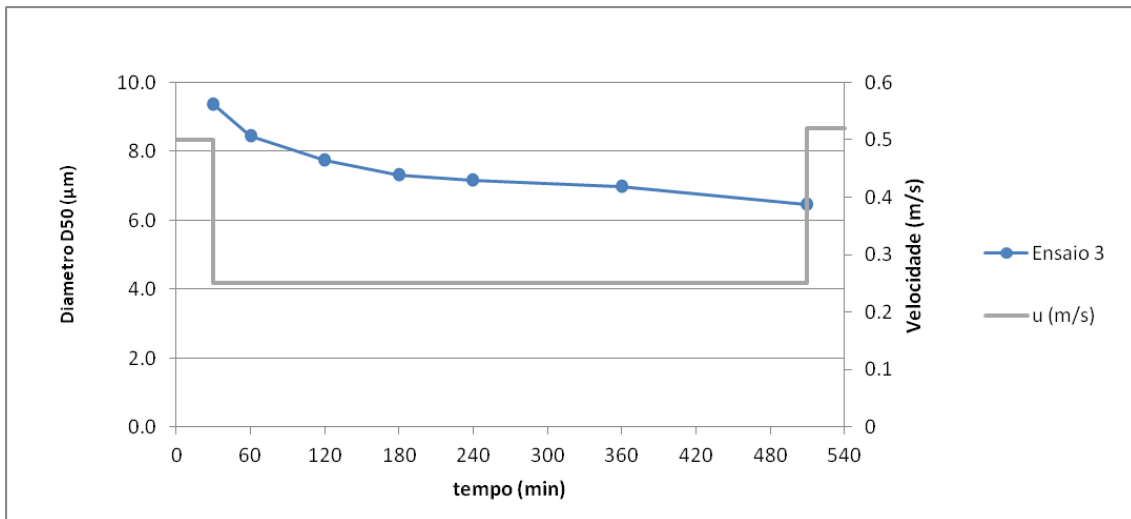
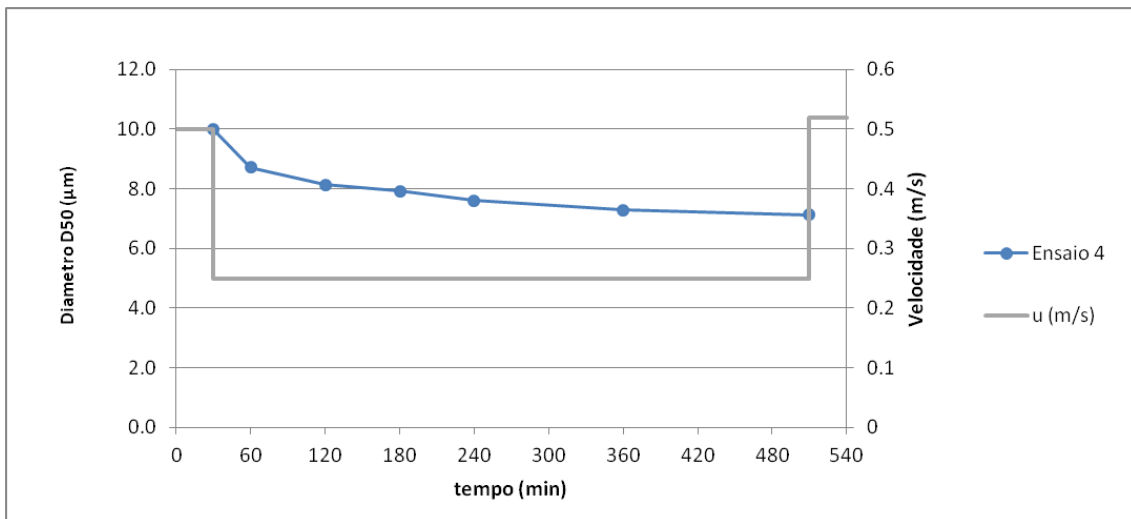
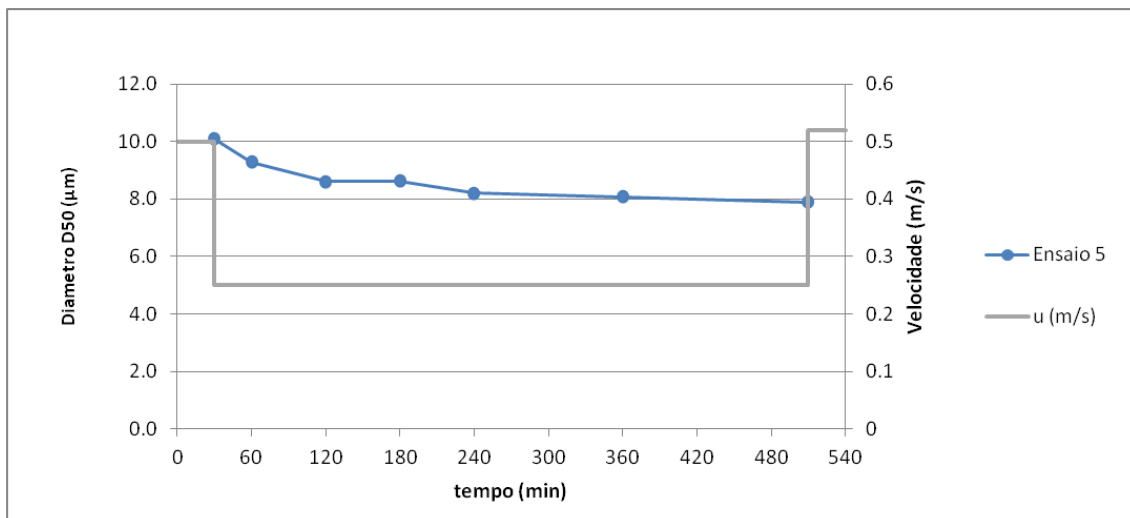


Figura A. 24 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 4



**Figura A. 25 - Diâmetro D50 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 5**

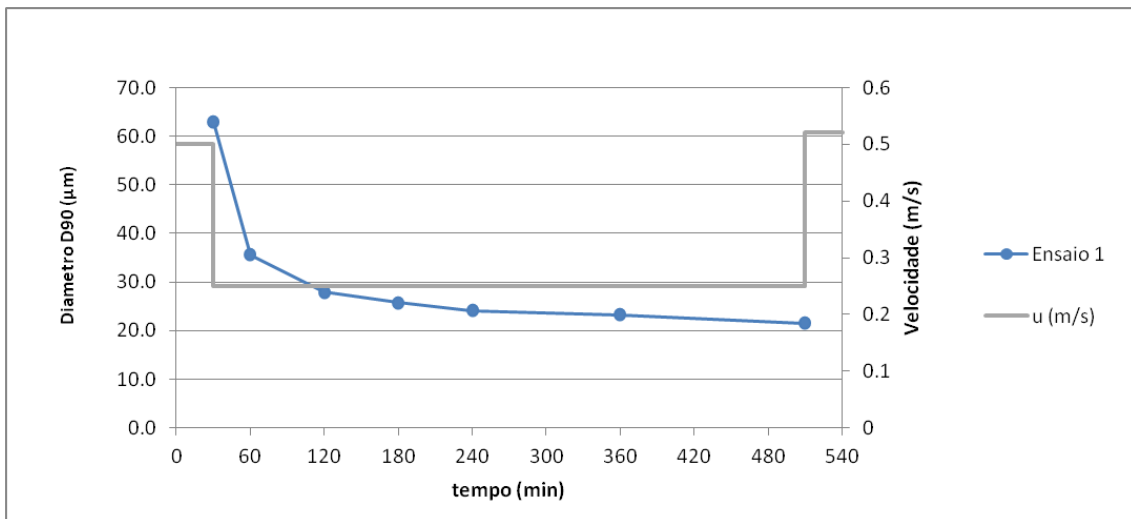


**Tabela A. 8 - Resultados dos ensaios de deposição: Diâmetro D90 e velocidade após a colheita da amostra ao longo do tempo para diferentes salinidades**

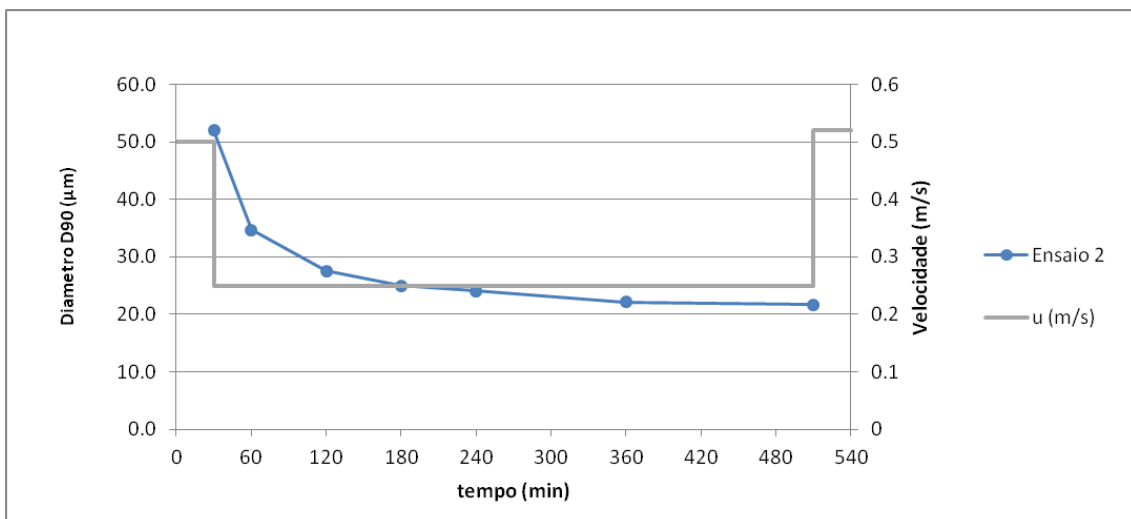
Hora	Tempo (min)	u (m/s)	Amostras	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
				S=0	S=2.5	S=5	S=10	S=15
9:00	0	0.50	-	-	-	-	-	-
9:30	30	0.25	14	62.893	52.040	48.163	50.733	48.143
10:00	60	0.25	15	35.657	34.750	32.863	32.547	32.787
11:00	120	0.25	16	27.883	27.600	26.547	26.760	26.187
12:00	180	0.25	17	25.703	24.983	23.923	25.227	24.957
13:00	240	0.25	18	24.140	24.030	24.123	22.843	23.577
15:00	360	0.25	19	23.297	22.183	21.857	22.457	22.743
17:30	510	0.52	20	21.560	21.737	19.207	21.157	21.940



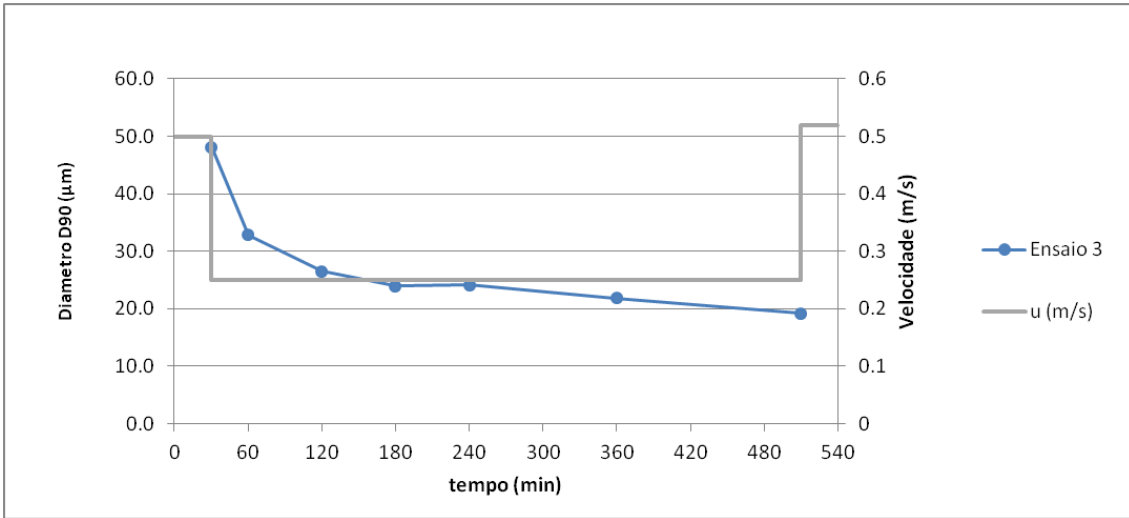
**Figura A. 26 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 1**



**Figura A. 27 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 2**



**Figura A. 28 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 3**



**Figura A. 29 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 4**

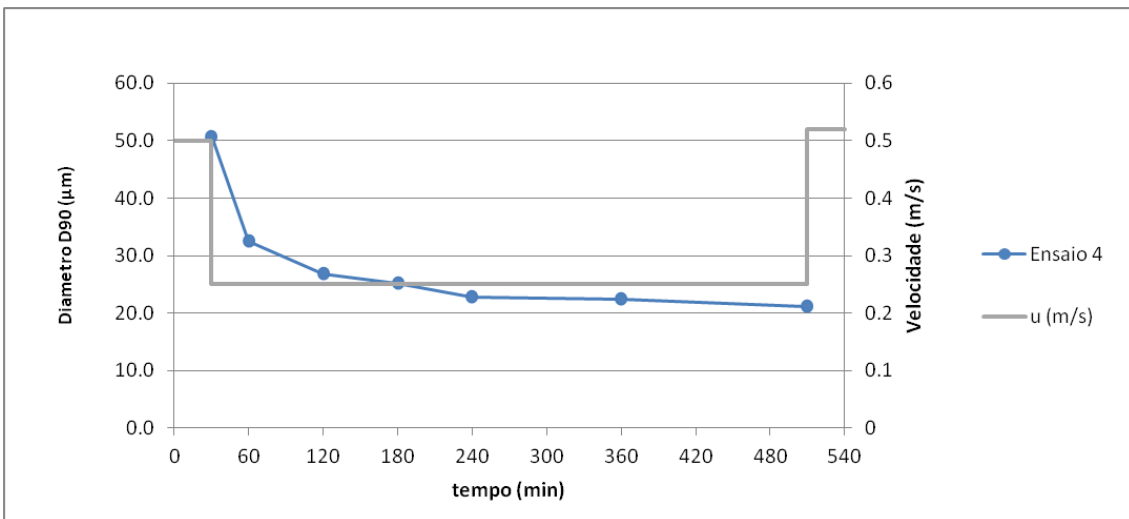


Figura A. 30 - Diâmetro D90 e velocidade em função do tempo: Ensaio de Deposição 5

